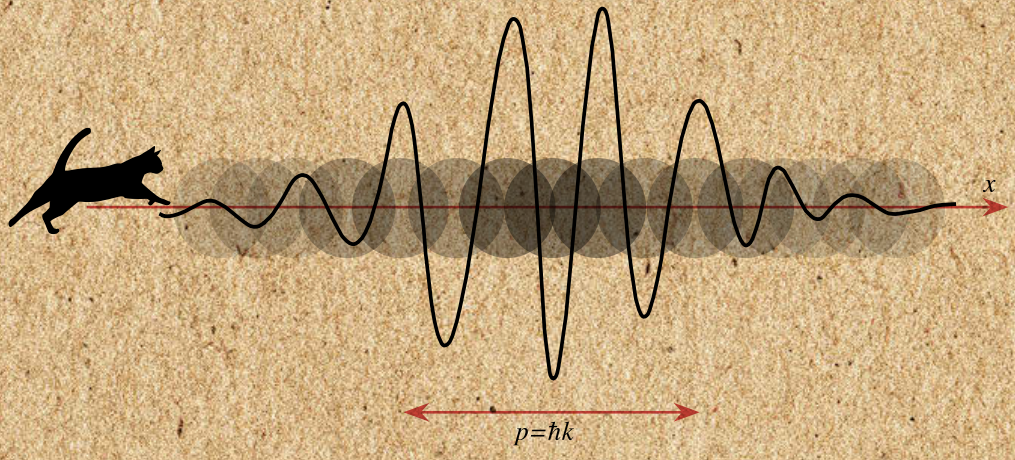
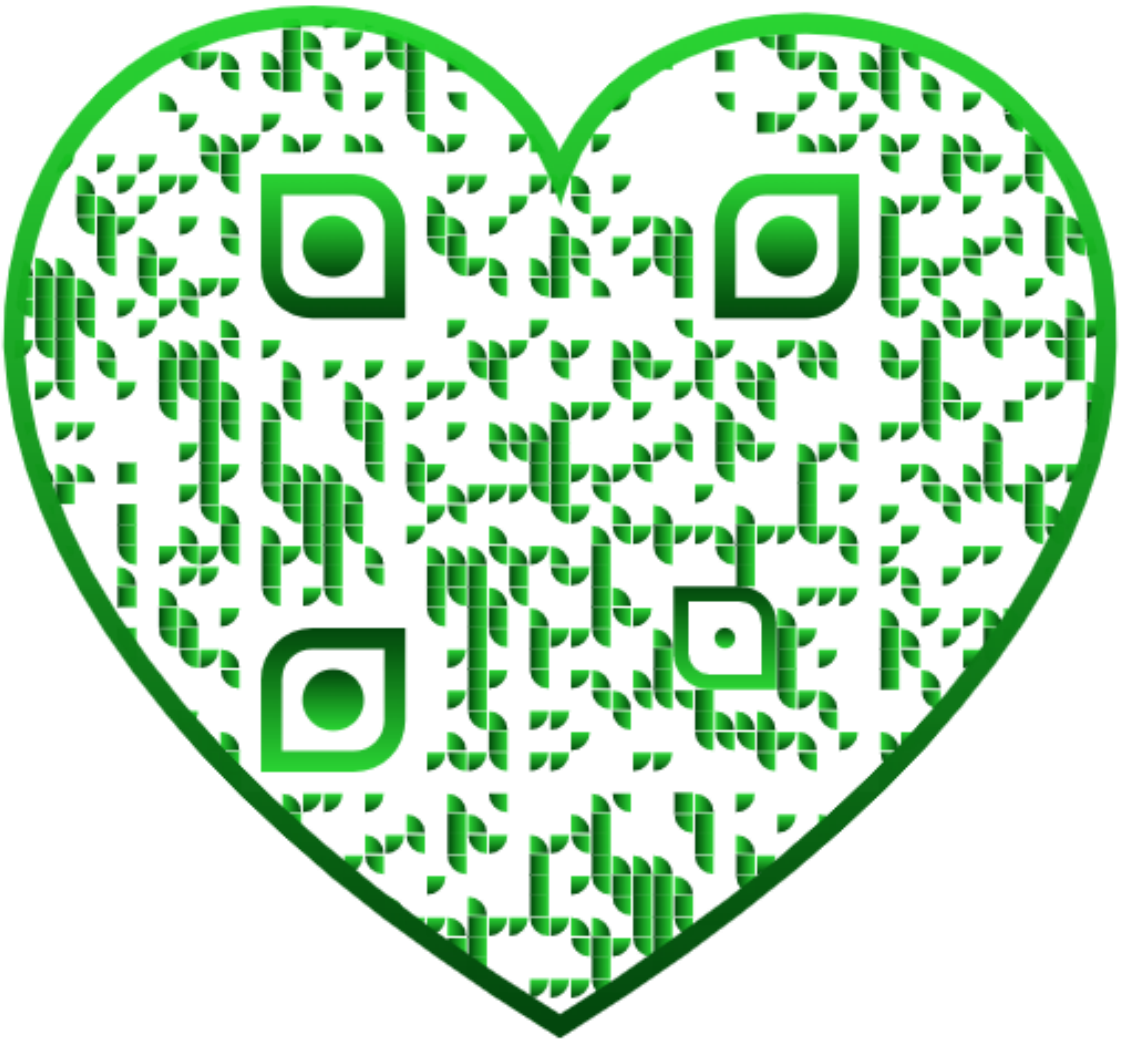
Physique quantique en 30 secondes

Les 50 théories quantiques les plus importantes, expliquées en moins d'une minute

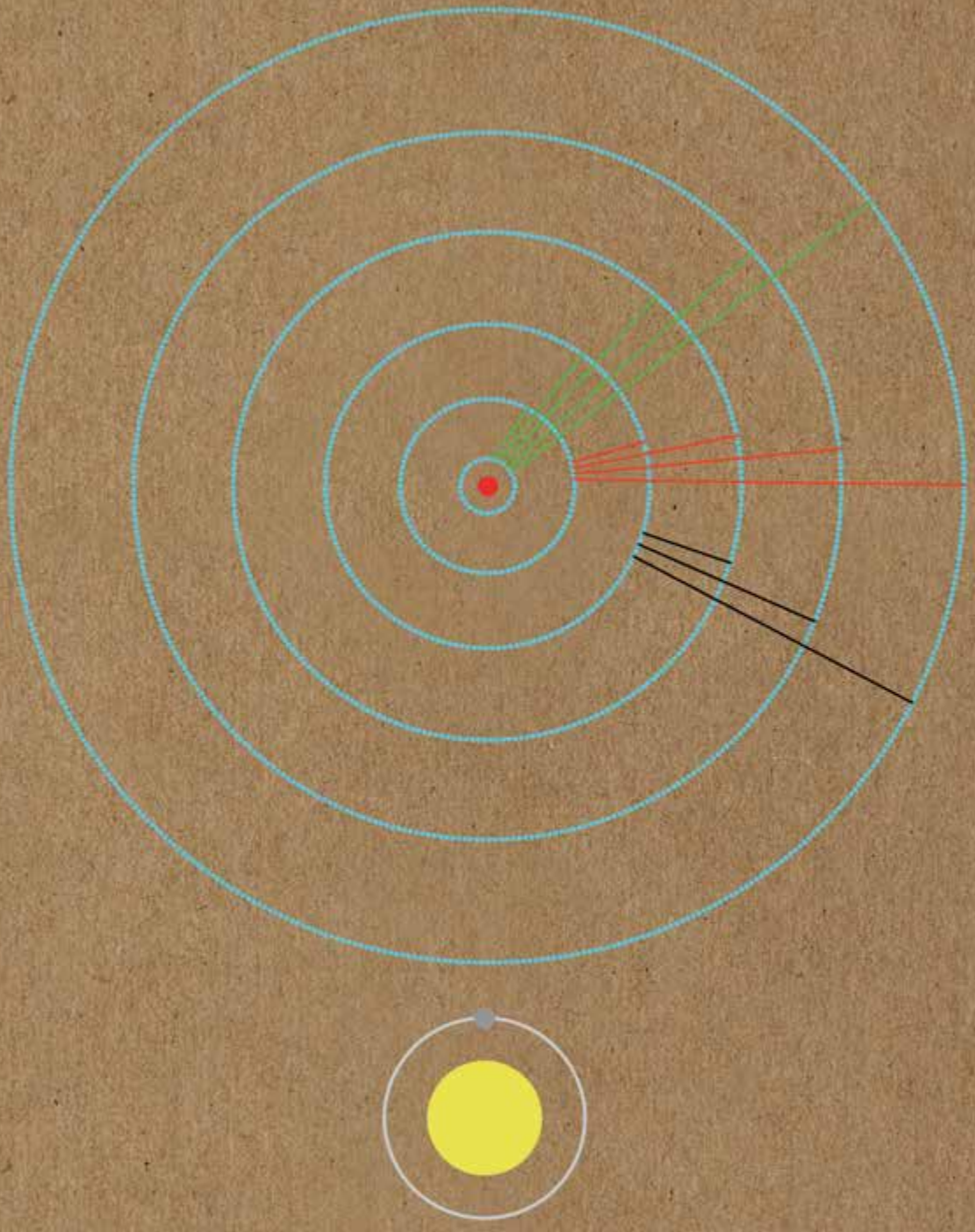


Brian Clegg

Hurtubise



Physique quantique en 30 secondes



Physique quantique en 30 secondes

Les 50 théories quantiques les plus importantes, expliquées en moins d'une minute

Brian Clegg

Collaborateurs
Philip Ball
Brian Clegg
Leon Clifford
Frank Close
Sophie Hebden
Alexander Hellemans
Sharon Ann Holgate
Andrew May

Traduit de l'anglais par
Rachel Martinez et Richard Dubois

Hurtubise

Hurtubise

Physique quantique en 30 secondes

Copyright © 2014,
Éditions Hurtubise inc. pour l'édition
en langue française en Amérique du Nord

Titre original de cet ouvrage :
30-Second Quantum Theory

Les Éditions Hurtubise bénéficient du soutien financier des institutions suivantes pour leurs activités d'édition :
- Gouvernement du Canada par l'entremise du Fonds du livre du Canada (FLC) ;
- Gouvernement du Québec par l'entremise du programme de crédit d'impôt pour l'édition de livres.

Direction de création : Peter Bridgewater
Édition : Susan Kelly
Direction de publication : Caroline Earle
Direction artistique : Michael Whitehead
Chargé de proget : Jamie Pumfrey
Design et maquette : Ginny Zeal
Illustrations : Ivan Hissey
Rédaction des textes des glossaires : Brian Clegg
Traduction de l'anglais et adaptation :
Rachel Martinez et Richard Dubois
Édition : Corinne Dumont
Mise en pages : La boîte de Pandore
Montage de la couverture : Geneviève Dussault

Édition originale produite et réalisée par :
Ivy Press
210 High Street, Lewes
East Sussex BN7 2NS, R.-U.

Copyright © 2014, Ivy Press Limited
Copyright © 2014, Éditions Hurtubise
pour la traduction française

ISBN : 978-2-89723-448-5
ISBN (PDF) : 978-2-89723-449-2
ISBN (ePub) : 978-2-89723-450-8
Dépôt légal : 3e trimestre 2014
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
Bibliothèque et Archives Canada

Diffusion-distribution au Canada :
Distribution HMH
1815, avenue De Lorimier
Montréal (Québec) H2K 3W6
www.distributionhmh.com

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, stockée dans quelque mémoire que ce soit ou transmise sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, électronique, mécanique, par photocopie, enregistrement ou autres, sans l'autorisation préalable écrite du propriétaire du copyright.

Imprimé en Chine
www.editionshurtubise.com

DANS LA MÊME COLLECTION :

Paul Parsons
Théories en 30 secondes, 2010.

Barry Loewer
Philosophies en 30 secondes, 2011.

Donald Marron
Théories économiques en 30 secondes, 2011.

Steven L. Taylor
Politique en 30 secondes, 2011.

Christian Jarret
Psychologie en 30 secondes, 2012.

Richard J. Brown
Mathématiques en 30 secondes, 2012.

Russell Re Manning
Religions en 30 secondes, 2012.

Robert A. Segal
Mythologie en 30 secondes, 2012.

Gabrielle M. Finn
Anatomie en 30 secondes

Edward Denison
Architecture en 30 secondes, 2013.

Eric Scerri
Éléments en 30 secondes, 2013.

François Fressin
Astronomie en 30 secondes, 2013.

Russell Re Manning
La Bible en 30 secondes, 2013.

Anil Seth
Le Cerveau en 30 secondes, 2014.

Jean-Pierre Charland et Sabrina Moisan
L'histoire du Québec en 30 secondes, 2014.

Matthew Nicholls
La Rome antique en 30 secondes, 2014.

Peter Der Manuelian
L'Égypte ancienne en 30 secondes, 2014.

SOMMAIRE

6 Introduction

Origines de la théorie

14 GLOSSAIRE
16 La catastrophe ultraviolette
18 Les quanta de Planck
20 L'effet photoélectrique selon Einstein
22 La série prévisible de Balmer
24 L'atome de Bohr
26 Portrait : Niels Bohr
28 La dualité onde/particule
30 Les ondes de matière de Louis de Broglie
32 La double fente quantique

Notions essentielles

36 GLOSSAIRE
38 Le spin quantique
40 La mécanique matricielle
42 L'équation de Schrödinger
44 Portrait : Erwin Schrödinger
46 Le chat de Schrödinger
48 Le principe d'indétermination d'Heisenberg
50 La réduction de la fonction d'onde
52 La décohérence

Physique de la lumière et de la matière

56 GLOSSAIRE
58 Le principe d'exclusion de Pauli
60 L'équation de Dirac
62 Portrait : Paul Dirac
64 La théorie des champs quantifiés
66 QED quelques principes de base
68 Les dangers de la renormalisation
70 Les diagrammes de Feynman
72 Reculer dans le temps

Effets quantiques et interprétation

76 GLOSSAIRE
78 Les diviseurs de faisceau
80 L'effet tunnel
82 Les expériences supraluminiques
84 L'interprétation de Copenhague
86 L'interprétation de Bohm
88 Portrait : David Bohm
90 La réduction par la conscience
92 L'interprétation des mondes multiples

Intrication quantique

96 GLOSSAIRE
98 L'EPR
100 L'inégalité de Bell
102 Portrait : John Bell
104 Le chiffrement quantique
106 Les bits quantiques (qubits)
108 L'informatique quantique
110 La téléportation quantique
112 L'effet Zénon quantique

Applications quantiques

116 GLOSSAIRE
118 Le laser
120 Le transistor
122 Le microscope électronique
124 Les appareils d'IRM
126 Les jonctions de Josephson
128 Portrait : Brian Josephson
130 Les points quantiques
132 L'optique quantique

Extrêmes quantiques

136 GLOSSAIRE
138 L'énergie au zéro absolu
140 Les supraconducteurs
142 Les superfluides
144 Le condensat de Bose-Einstein
146 Portrait : Satyendra Nath Bose
148 La chromodynamique quantique
150 La biologie quantique
152 La gravité quantique

154 Sources
156 À propos des collaborateurs
158 Index
160 Remerciements

INTRODUCTION

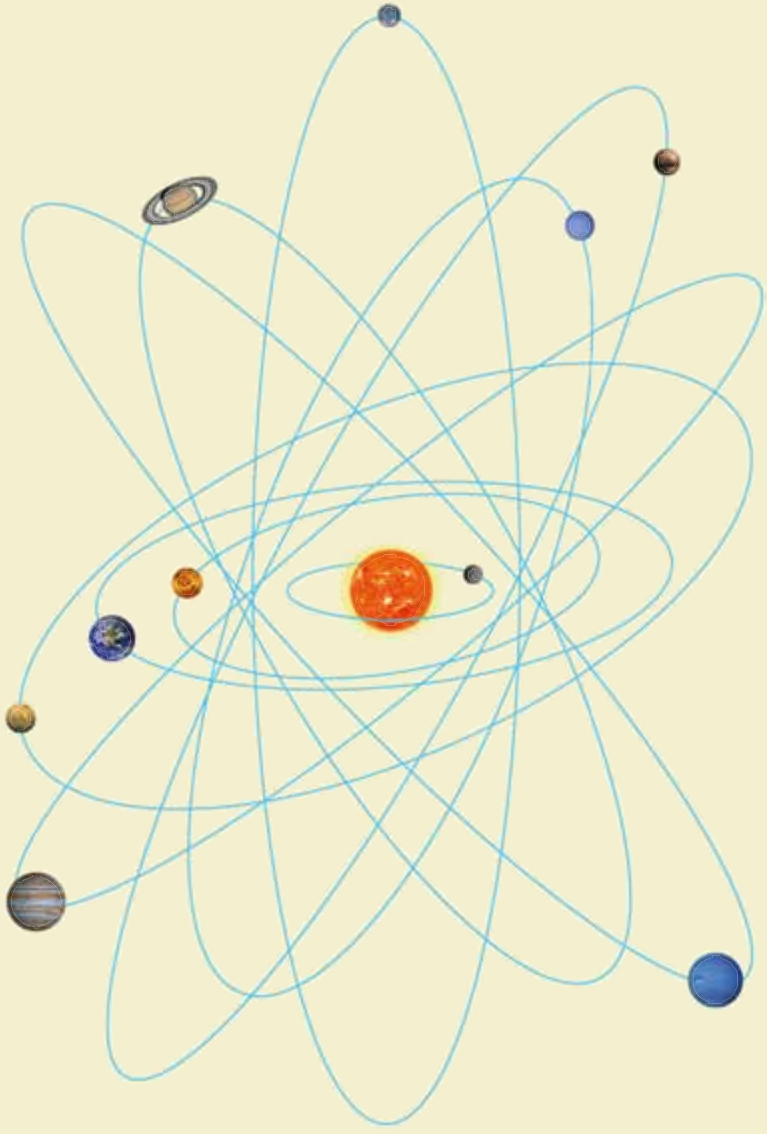
Brian Clegg

En toute honnêteté, la physique enseignée à l'école peut être plutôt ennuyeuse. Elle a sa valeur, elle est bien sûr nécessaire, comme toute science du 19e siècle, mais elle ne bouleverse pas grand-chose. C'est vraiment dommage de ne pas initier les jeunes élèves aux aspects les plus excitants de cette discipline, et il n'y a rien de plus stimulant et de plus intrigant en science que la théorie quantique.

De petites choses

Dans la Grèce antique, on imaginait déjà que la matière était constituée de minuscules fragments. Toutefois, les notions des atomistes (« atome » provient du mot grec *atomas*, qui signifie « que l'on ne peut couper ») ont été en grande partie rejetées au profit de la théorie des quatre éléments, selon laquelle tout était constitué d'eau, d'air, de feu et de terre. À la fin du 19e siècle, les atomes avaient retrouvé la faveur populaire à titre de concepts utiles en chimie et en physique, mais personne ne savait exactement ce qu'ils étaient ni comment ils fonctionnaient. Certains doutaient même de leur existence. À la surprise des scientifiques, non seulement les atomes existaient bel et bien, mais ces constituants microscopiques présents dans absolument tout — d'un être humain à un grain de poussière — se comportaient aussi plus étrangement que ce à quoi l'on pouvait s'attendre.

Au départ, on a tenu pour acquis que les atomes et leurs éléments constituants se comporteraient exactement comme des versions miniatures des objets courants qui nous entourent. Ainsi, les scientifiques croyaient que les atomes volaient dans les airs tout comme des balles de tennis, mais à plus petite échelle. Lorsque l'on a découvert que les atomes avaient une structure interne, on a émis l'hypothèse qu'ils étaient constitués de charges négatives dispersées dans un corps positif puis, quand on a constaté que la plus grande part de leur masse se concentrait dans un noyau central, on a privilégié un modèle rappelant un système solaire miniature.



La révolution quantique

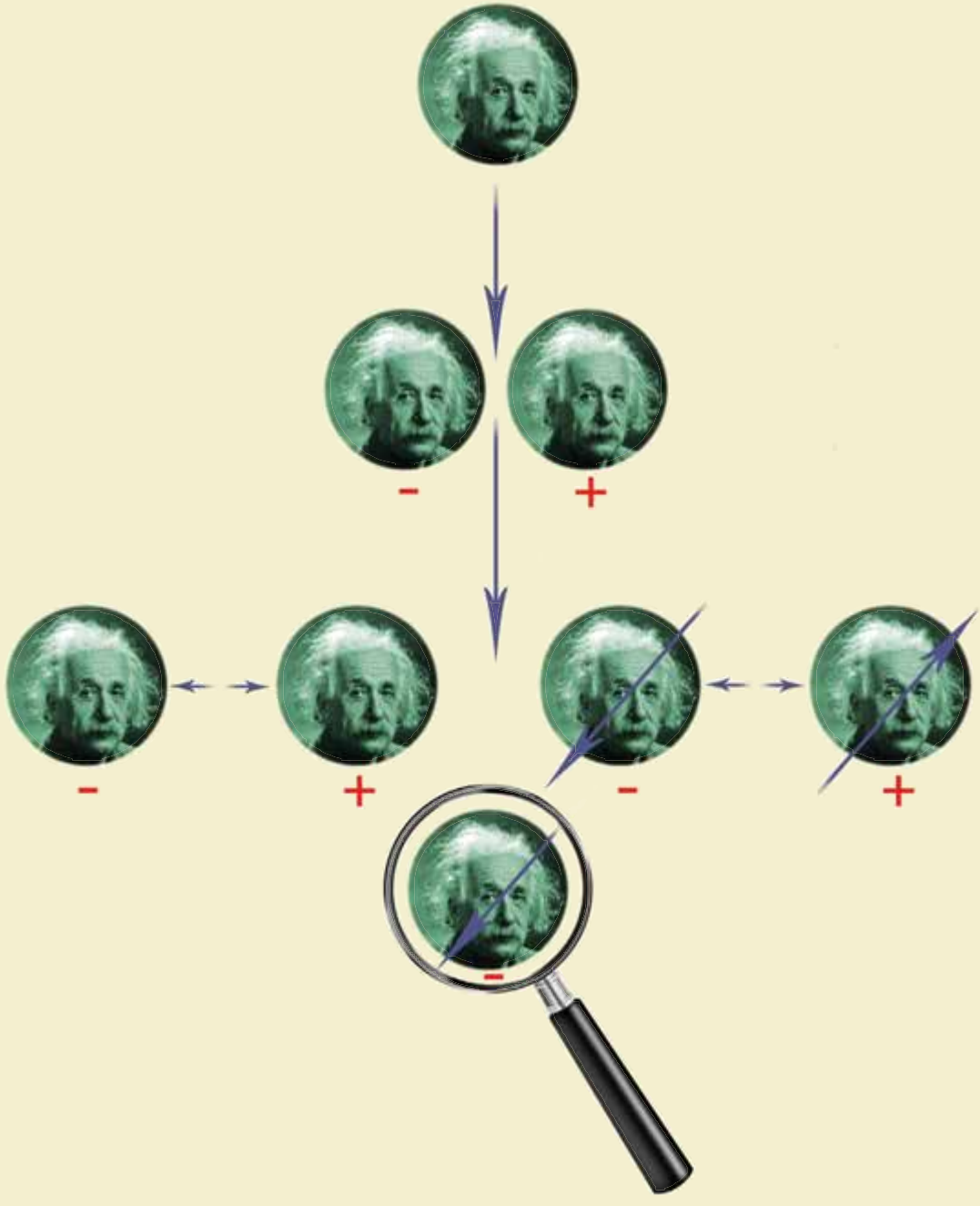
Cette image s'est révélée impossible à conserver, ce qui a ébranlé la vieille garde de la physique (et ravi le reste du monde). Un atome constitué comme un système solaire serait instable, et les particules quantiques n'adoptaient pas le comportement prévisible des balles de tennis. Au fil de l'élaboration de la théorie quantique, on a constaté qu'il y avait indéniablement une différence fondamentale entre le monde microscopique et la réalité macroscopique. Les balles de tennis suivent une trajectoire déterminée par leur masse et les forces qui agissent sur elles. Mais dans le cas des particules quantiques, on ne pouvait faire mieux qu'émettre des hypothèses sur leur comportement qui manifestait un caractère aléatoire fondamental. Avant d'être en mesure de les observer, on n'avait jamais pu être tout à fait certain de ce qu'elles allaient faire.

Cette caractéristique choquait Einstein : « L'idée qu'un électron exposé à un rayonnement choisit en toute liberté le moment et la direction où il sautera m'est insupportable. S'il en est ainsi, j'aimerais mieux être cordonnier ou même employé dans un tripot que physicien. » C'est également ce qui lui a inspiré ses célèbres remarques voulant que « Dieu ne joue pas aux dés. » D'autres, toutefois, étaient fascinés.

Pour sa part, le célèbre physicien quantique américain Richard Feynman a déclaré : « Je vais vous décrire comment est la Nature, et si vous n'aimez pas cela, vous ne pourrez pas la comprendre. [La théorie quantique] décrit la Nature comme une absurdité du point de vue du bon sens. Et cela correspond tout à fait aux observations expérimentales. J'espère donc que vous accepterez la Nature telle qu'elle est : absurde. » Quant à moi, j'espère que cet ouvrage vous donnera l'occasion d'éprouver le même plaisir que procuraient à Feynman l'étrangeté et l'absurdité mêmes de l'univers quantique.

Diviser le quantum

Il y a certainement peu de sujets qui sont plus propices que la théorie quantique à être divisés en bouchées facilement assimilables. Les 50 articles qui suivent sont divisés en 7 sections qui abordent chacune un secteur de cette formidable entreprise. Nous commençons, fort à propos, par les **Origines de la théorie**, expliquant comment le point de vue classique selon lequel les atomes n'étaient pas différents des objets qui



nous entourent s'est trouvé ébranlé par l'observation, et comment la mission de trouver une façon pour les atomes d'être stables a exigé une approche très différente.

Nous passons ensuite aux **Notions essentielles**, c'est-à-dire les composantes clés de la théorie quantique, dont certaines — tel le principe d'indétermination de Heisenberg — ont franchi les limites de la physique pour s'immiscer dans la culture populaire. Une fois ces éléments fondamentaux bien en place, nous pouvons ouvrir le domaine de la science de presque tout notre quotidien, la **Physique de la lumière et de la matière**. L'électrodynamique quantique, la théorie qui explique tout (de la façon dont la lumière du Soleil nous réchauffe à la raison pour laquelle nous ne traversons pas notre chaise en nous asseyant dessus), nous oblige à considérer le monde quantique d'une toute nouvelle façon. Elle est devenue la théorie qui a prédit avec le plus de précision ce qui est observé.

Nous passons ensuite à **Effets quantiques et interprétation**, qui explique comment nous pouvons à la fois voir à travers une fenêtre et y voir une réflexion, ou comment l'effet tunnel permet au Soleil de continuer à agir, sans oublier le délicat sujet de l'interprétation quantique. La théorie quantique est presque unique à cet égard : elle réussit très bien à prédire ce que nous observons, mais personne n'est certain de ce que la théorie elle-même représente exactement. Des descriptions comme les interprétations de Copenhague, des mondes multiples et de Bohm tentent d'inclure ce qui est observé dans un cadre expliquant la cause de telles observations. Toutefois, nous ne disposons encore d'aucun moyen de distinguer ces options les unes des autres et nous choisissons en fonction de nos préférences personnelles plutôt qu'en nous fiant à une saine logique scientifique.

Dans la section suivante, nous découvrons le phénomène le plus remarquable de la théorie quantique : l'**Intrication quantique**. Décrit par Einstein (qui espérait utiliser ce concept pour réfuter la théorie quantique) comme une « étrange action à distance », l'intrication permet à une particule quantique d'en influencer une autre instantanément, peu importe la distance qui les sépare, ce qui est vraisemblablement contradictoire à la limite de la vitesse de la lumière selon la relativité restreinte. Pourtant, des expériences successives en ont confirmé l'existence, et le fonctionnement d'applications, comme le chiffrement

quantique et les ordinateurs quantiques, repose sur l'intrication quantique.

Les deux dernières sections de ce livre présentent les façons dont la technologie basée sur la théorie quantique s'est immiscée dans notre quotidien, ainsi que les innombrables perspectives offertes par la physique quantique. Dans **Applications quantiques**, nous découvrons notamment le laser, le transistor et l'imagerie par résonance magnétique. Chaque fois que nous utilisons l'électricité, nous faisons appel à un phénomène quantique, mais l'électronique a fait d'une connaissance explicite de la théorie quantique un élément important de la conception de la technologie, au point où l'on estime qu'environ le tiers du produit intérieur brut des pays développés provient de la technologie fondée sur la théorie quantique.

Dans la section **Extrêmes quantiques**, nous voulons englober le mystère de l'énergie au zéro absolu (vénérée par la science parallèle et qui est un véritable effet quantique selon lequel même un vide n'est pas vide), le comportement particulier des températures extrêmement basses et le prolongement de la théorie quantique dans le noyau nucléaire, la gravité et même la biologie.

À pieds joints

Chaque sujet est appuyé par une illustration vivante et fragmenté pour être plus accessible. La section *Théorie en 30 secondes* fournit la description principale, tandis que le *Condensé en 3 secondes* résume le sujet d'un coup d'œil. Si vous souhaitez en savoir davantage, la *Réflexion en 3 minutes* pousse plus loin un aspect particulièrement intrigant du sujet principal. Enfin, la rubrique *Théories liées* suggère des thèmes connexes traités dans cet ouvrage, tandis que *Biographies en 3 secondes* liste les principaux acteurs du développement dans le domaine visé.

La présentation de cet ouvrage est elle-même décomposée en unités quantiques fournissant les éléments essentiels pour découvrir, apprécier et assimiler ce qui est sans doute l'aspect le plus fascinant et le plus complexe de toute la science. Tout ce que nous faisons, tout ce que nous voyons comporte des particules quantiques. Et pourtant, ces particules sont totalement différentes de tout ce que nous connaissons. Voilà le paradoxe et le plaisir de la théorie quantique que vous êtes sur le point de découvrir.

ORIGINES DE LA THÉORIE

ORIGINES DE LA THÉORIE
GLOSSAIRE

complémentarité Puisqu'en théorie quantique l'acte de mesurer influence le résultat, les différentes mesures sont complémentaires. Ainsi, en fonction de la façon dont on mesure la lumière, on peut la considérer comme une onde ou une particule, mais non les deux à la fois. En vertu de ce principe, la réalité n'est ni l'une ni l'autre, mais un tout dont on ne peut saisir qu'un aspect avec une expérience donnée.

constante de Planck Constante fondamentale de la nature, techniquement le « quantum d'action » où l'action est une représentation mathématique de l'énergie d'un système tandis qu'elle se déplace en suivant une trajectoire. La constante, symbolisée par Planck lui-même par *h*, décrit la relation entre l'énergie d'un photon et sa fréquence (couleur). Il s'agit d'une très petite valeur : $6{,}6 \times 10^{-34}$ joule seconde.

corps noir Objet hypothétique qui absorbe toute la lumière qui le frappe, quelle qu'en soit la fréquence ou la direction. Un corps noir à une température constante émet un spectre lumineux (appelé « rayonnement du corps noir ») qui dépend essentiellement de sa température et n'est pas influencé par la nature du corps.

fréquence Nombre de fois où un phénomène répétitif se produit en une seconde. On l'utilise souvent pour exprimer le nombre de cycles d'une onde au cours d'une seconde (on mesure alors en hertz, où 1 Hz correspond à un cycle par seconde). La fréquence d'une onde correspond à sa vitesse divisée par sa longueur. Dans le cas d'un objet quantique, la fréquence est proportionnelle à l'énergie de l'objet.

lepton Particule fondamentale dotée d'une valeur de spin quantique de 1/2 et dont le meilleur exemple connu est l'électron. Le muon, le tau et les trois types de neutrinos sont d'autres leptons.

loi de Planck Rapport entre l'énergie d'un photon et sa fréquence exprimé sous la forme $E=h\upsilon$, où *h* correspond à la constante de Planck et υ à la fréquence.

longueur d'onde Longueur d'une onde répétitive, son cycle complet jusqu'au point de départ. La longueur d'onde correspond à la vitesse divisée par la fréquence.

photon Particule quantique de lumière qui transporte la force électromagnétique.

Jusqu'au 20e siècle, on croyait que la lumière était une onde, mais la théorie et l'expérience ont démontré qu'il s'agit aussi d'une particule dépourvue de masse.

quanta Pluriel de *quantum* (du latin signifiant « combien ») utilisé pour désigner une particule ou un « petit paquet » fournissant l'unité minimale d'énergie ou de matière, d'où « théorie quantique », qui décrit le comportement des particules de matière et de lumière. Lorsqu'une valeur est « quantifiée », elle est donnée en quantités individuelles. Par exemple, une famille moyenne comprend 2,3 enfants, mais les données sont quantifiées : une famille ne peut avoir en réalité qu'un nombre entier d'enfants.

radiation de Hawking Effet quantique prédit par Stephen Hawking qui se produit lorsque des particules virtuelles apparaissent puis disparaissent brièvement dans l'espace. Elles ne laissent généralement aucune trace, mais si ce phénomène survient à proximité de l'horizon des événements d'un trou noir, une particule peut être attirée dans le trou tandis que l'autre s'envole en causant une radiation. (Ainsi, les trous noirs ne sont pas vraiment noirs.) La radiation de Hawking est un exemple de rayonnement du corps noir et équivaut à celui d'un corps noir à une température inversement proportionnelle à la masse du trou noir.

saut quantique Malgré la popularité de cette expression dans le langage courant pour décrire un changement considérable, un saut quantique est en fait un très petit bond. Il correspond au déplacement entre deux niveaux d'un système quantique, par exemple le bond que fait un électron entre deux orbites adjacentes.

trou noir Endroit où la matière est devenue si compacte qu'elle s'affaisse à un point inférieur à la force gravitationnelle. Un trou noir est le plus souvent formé à la suite de l'affaissement d'une étoile gigantesque. Sa taille apparente est appelée « horizon des événements » et correspond à la distance du centre d'où rien, pas même la lumière, ne peut s'échapper. Le trou noir lui-même est une singularité, un point sans dimension.

LA CATASTROPHE ULTRAVIOLETTE

Théorie en 30 secondes

Les histoires populaires de mécanique quantique accordent généralement un rôle prépondérant à la soi-disant catastrophe ultraviolette. Au tournant du 20e siècle, les physiciens ont remarqué que la physique classique prédisait que l'énergie électromagnétique émise par un « corps noir » — que l'on pourrait imaginer comme un objet chaud qui absorbe toute la lumière — se dirige vers l'infini dans le cas de longueurs d'onde plus courtes que celles de la lumière visible dans la portion ultraviolette du spectre. Cette théorie était de toute évidence fausse et en 1900, Planck a découvert qu'il pouvait éviter cette catastrophe » en tenant pour acquis que les atomes oscillants dans le corps noir ne pouvaient émettre de l'énergie qu'en paquets distincts — des quanta — de taille proportionnelle à la fréquence de leurs vibrations. Il a attribué à la constante de proportionnalité le symbole *h*. On discute encore de la façon exacte dont Planck considérait ses « quanta », mais il semble avoir rejeté pendant des années l'idée qu'ils correspondaient à la réalité et les considérait plutôt comme une commodité mathématique. Ce n'est que plus tard que l'on a souligné que les quanta résolvaient la catastrophe ultraviolette en imposant des restrictions sur les façons dont les atomes des corps noirs peuvent osciller à haute fréquence, diminuant ainsi l'énergie qui en émane. Quoi qu'il en soit, cette idée a mérité à Planck le prix Nobel de physique en 1918.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

L'hypothèse de Planck selon laquelle l'énergie est quantifiée (divisée en éléments distincts) a résolu le problème de la catastrophe ultraviolette prédite par la physique classique pour le rayonnement des corps noirs.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Un corps noir parfait semble une entité exotique, mais il s'agit en réalité d'une idéalisation d'un corps chaud. Le principe selon lequel plus un corps est chaud, plus il émet de rayonnement de courte longueur d'onde explique le rougeoiement d'un radiateur de terrasse pendant qu'il réchauffe.Le même principe s'applique aussi aux étoiles. Même les trous noirs émettent un rayonnement de corps noir, sous la forme de radiation de Hawking. Le trou noir agit plutôt comme un corps noir dont la température est inversement proportionnelle à sa masse.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LES QUANTA DE PLANCK
page 18

L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE SELON EINSTEIN
page 20

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

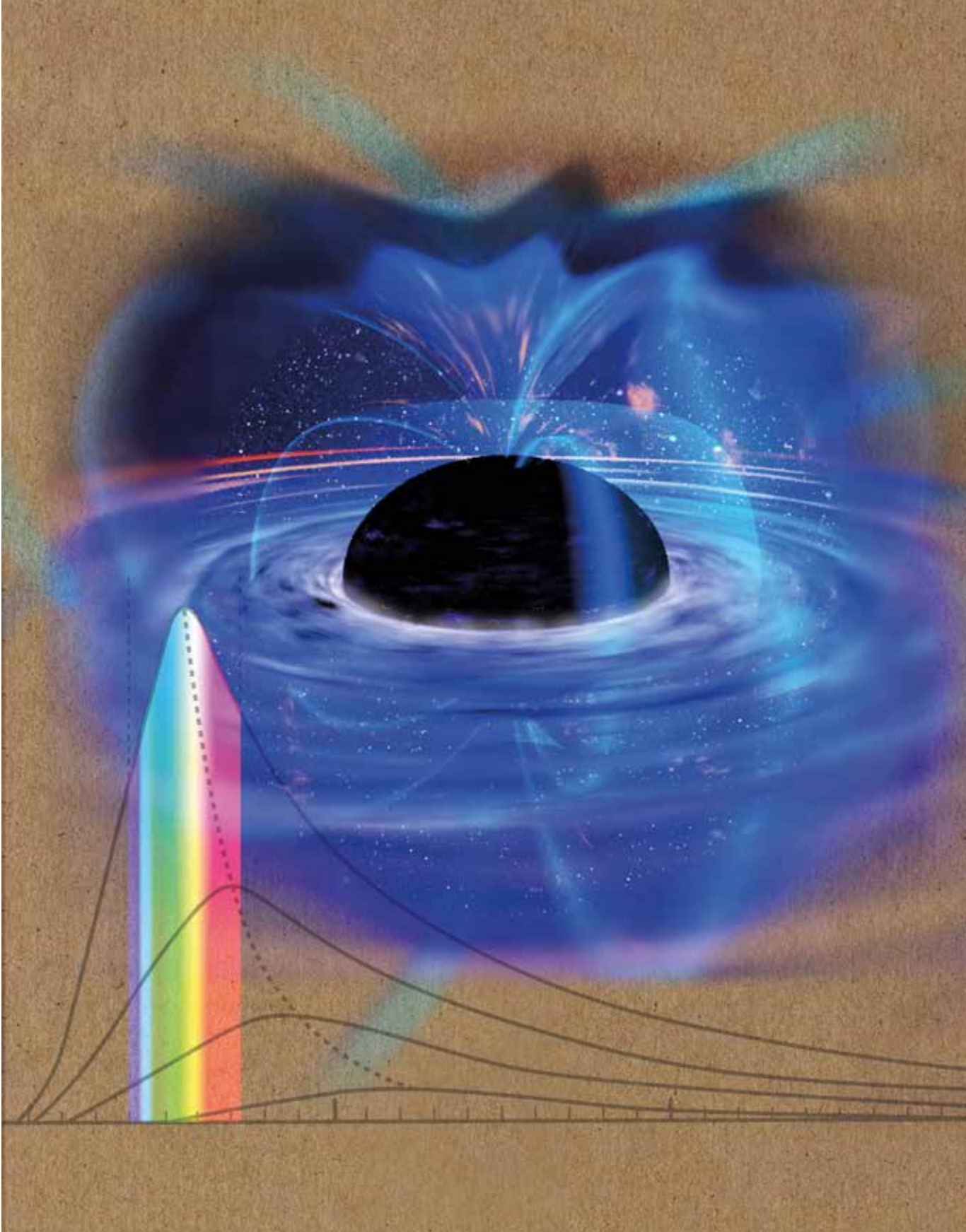
MAX PLANCK
1858–1947
Considéré au début du 20e siècle comme le doyen de la physique en Allemagne.

WILHELM WIEN
1864–1928
Physicien allemand qui a démontré que l'intensité du rayonnement du corps noir à différentes longueurs d'onde dépend de sa température.

TEXTE EN 30 SECONDES

Philip Ball

À moins que la lumière soit quantifiée, un corps noir devrait émettre un rayonnement de façon incontrôlable.



LES QUANTA DE PLANCK

Théorie en 30 secondes

À la fin des années 1890, un manufacturier allemand a demandé à un jeune physicien de son pays, Max Planck, de calculer la quantité d'énergie émise par les filaments chauds des ampoules électriques. Planck a dû résoudre un problème insoluble pour les physiciens de l'époque : trouver une formule pour la distribution des longueurs d'onde de la lumière et de la lumière infrarouge émise par un corps noir à une température donnée. Planck a essayé tous les moyens proposés par la physique classique, en vain. Dans ce qu'il a appelé un « geste désespéré », il a émis l'hypothèse qu'un corps chaud n'émet pas de rayonnement en continu, comme l'eau coulant d'un robinet, mais plutôt en gouttes, en petits paquets — des quanta — qu'il a appelés au début « éléments d'énergie ». Il a supposé que l'énergie de ces paquets était inversement proportionnelle à leur longueur d'onde, les paquets aux longueurs d'onde les plus courtes ayant l'énergie la plus élevée. Le rapport entre la longueur d'onde de ces quanta et leur énergie est connu sous le nom de « loi de Planck ». Lorsque le physicien a appliqué cette idée au calcul de l'énergie des longueurs d'onde de la lumière émise par les corps chauds, il a découvert que cette formule correspondait parfaitement aux mesures de laboratoire.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Planck a découvert la quantification de l'énergie — le fait que l'énergie est émise ou absorbée par la matière en paquets distincts appelés quanta —, ce qui a révolutionné la physique.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Au départ, Planck considérait le quantum comme une invention mathématique. Les physiciens n'y ont pas accordé beaucoup d'importance jusqu'à ce que Einstein explique, en 1905, l'effet photoélectrique en faisant un parallèle entre les quanta de Planck et les photons. La véritable nature physique des quanta est devenue claire par la suite, lorsque Bohr a expliqué comment les électrons ne se déplacent qu'en suivant des orbites fixes autour du noyau d'un atome et comment ils relâchent ou absorbent un photon chaque fois qu'ils changent d'orbite.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA CATASTROPHE ULTRAVIOLETTE
page 16

L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE SELON EINSTEIN
page 20

LA SÉRIE PRÉVISIBLE DE BALMER
page 22

L'ATOME DE BOHR
page 24

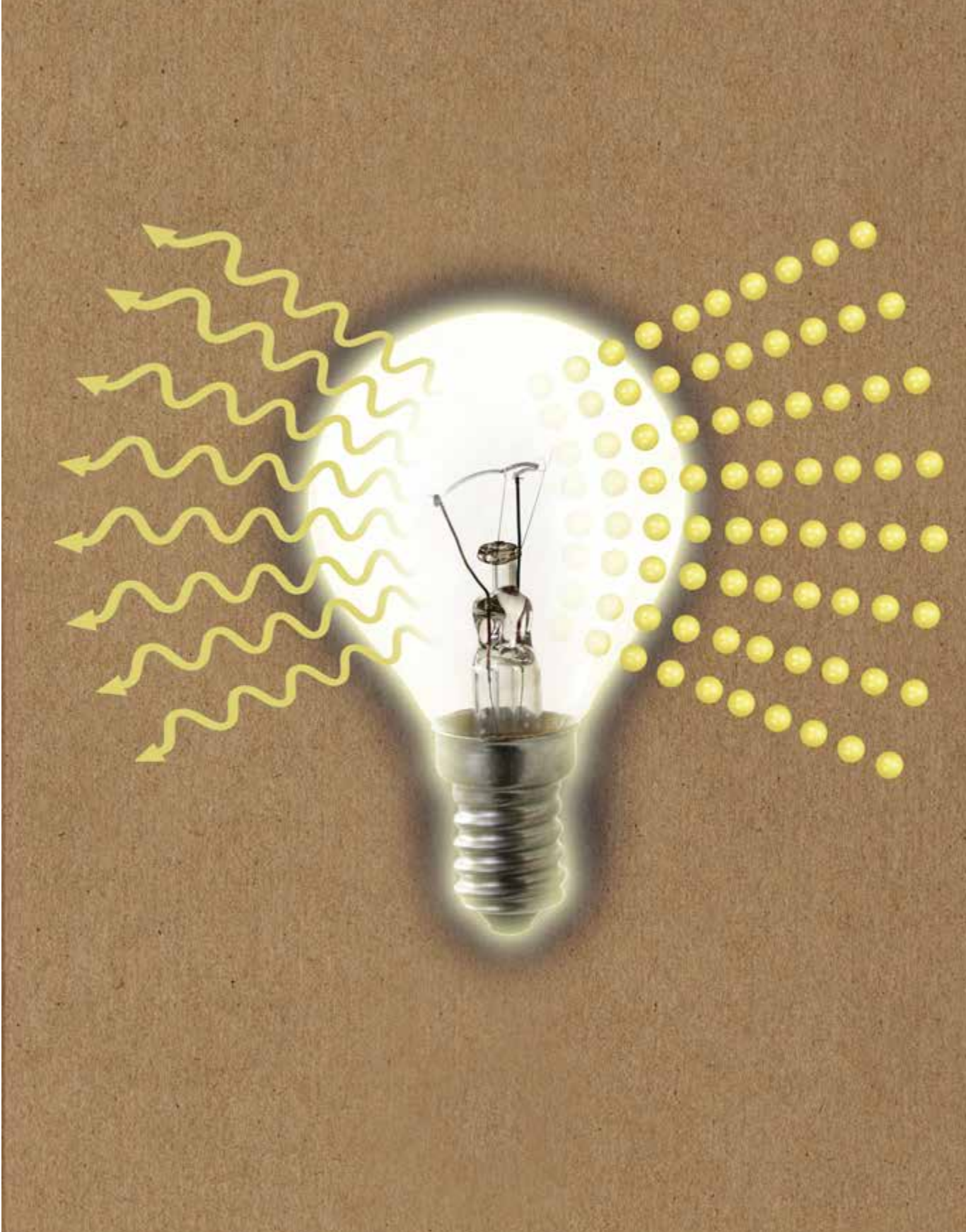
BIOGRAPHIE EN 3 SECONDES

NIELS BOHR
1885–1962
Pionnier danois de la théorie quantique qui s'est souvent dressé contre Einstein.

TEXTE EN 30 SECONDES

Alexander Hellemans

Plutôt que de considérer la lumière comme un flot continu d'ondes, Planck l'imaginait sous forme de paquets distincts : les quanta.



L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE SELON EINSTEIN

Théorie en 30 secondes

En 1905, Einstein semblait être une source inépuisable d'idées révolutionnaires. Cinq ans plus tôt, Planck avait émis l'hypothèse que les corps émettent un rayonnement électromagnétique comme la lumière en paquets ou « quanta » avec une énergie proportionnelle à leur fréquence. Pour Planck, cette hypothèse était une astuce mathématique qui permettait d'obtenir des résultats plausibles avec les équations. Mais la plupart des scientifiques ont jugé qu'Einstein allait trop loin lorsqu'il a avancé que la quantification de l'énergie n'était pas une quelconque excentricité de l'émission de lumière, mais bien une propriété fondamentale de la lumière elle-même ; que cette dernière n'était pas un faisceau continu, mais bien un flot de particules distinctes appelées photons. Toutefois, Einstein a proposé une façon de tester ses hypothèses. Au début des années 1900, Philipp Lenard avait démontré que la lumière projetée sur des pièces de métal éjectait des électrons : c'était l'effet photoélectrique. Fait étrange, cependant, si la lumière était plus vive, les électrons émis n'avaient pas plus d'énergie, mais ils étaient plus nombreux. Selon le nouveau modèle d'Einstein, cette observation avait du sens : un faisceau lumineux plus intense contient plus de photons qui émettent chacun autant d'énergie qu'avant. Robert Millikan a vérifié expérimentalement les prédictions d'Einstein au cours de la décennie suivante, et ce dernier a reçu en 1921 le prix Nobel de physique pour ses recherches.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

En proposant que la lumière est composée de paquets d'énergie appelés photons, Einstein a pu expliquer les caractéristiques intrigantes de l'effet photoélectrique.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Millikan a consacré 10 années de sa vie à tester la théorie d'Einstein au cours d'expériences qui exigeaient un soin méticuleux puisqu'il devait utiliser des électrodes d'une propreté parfaite. Pourquoi ? Parce qu'il était persuadé que la théorie était fausse. Même en obtenant des résultats qui soutenaient les prévisions, il a refusé de croire à la conception quantique de la lumière, soutenant qu'ils ne se basaient sur « aucun fondement théorique satisfaisant ». C'est souvent le cas des idées révolutionnaires.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA CATASTROPHE ULTRAVIOLETTE
page 16

LES QUANTA DE PLANCK
page 18

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

PHILIPP LENARD
1862–1947

Physicien expérimental allemand, lauréat du prix Nobel de physique en 1905 et sympathisant nazi qui qualifiait les travaux d'Einstein de « physique juive ».

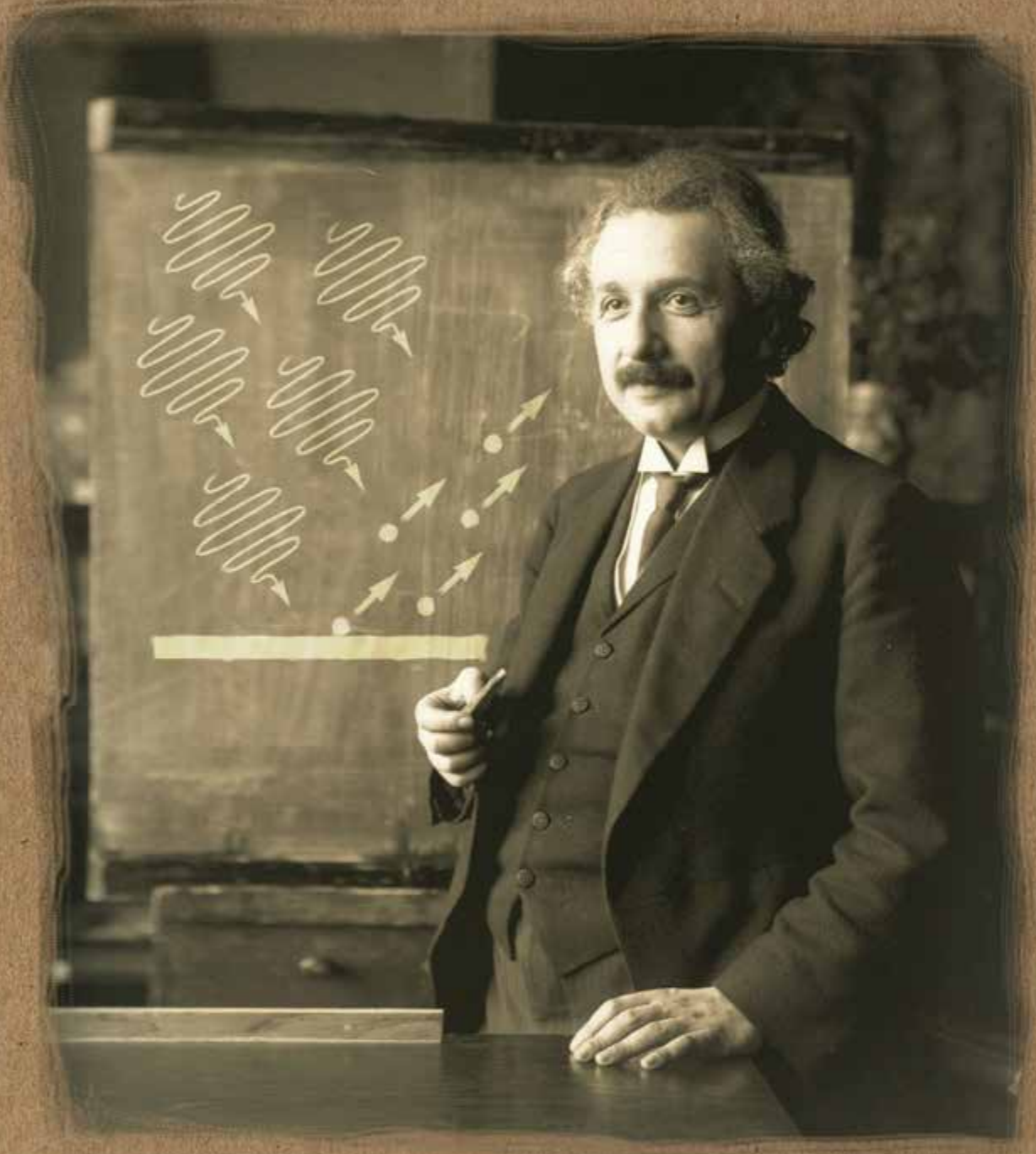
ALBERT EINSTEIN
1879–1955

Physicien né en Allemagne qui a développé la relativité restreinte et générale. Il a posé les fondements de la physique quantique.

TEXTE EN 30 SECONDES

Philip Ball

Einstein a découvert lors de ses expériences en photoélectrique que c'était l'énergie des quanta de lumière individuels qui éjectait des électrons.



LA SÉRIE PRÉVISIBLE DE BALMER

Théorie en 30 secondes

Lorsque Niels Bohr travaillait à l'élaboration de son modèle quantique de l'atome, il avait pour objectif de fournir une structure stable permettant aux électrons d'exister autour d'un noyau central de charge positive. Toutefois, en février 1913, il a eu vent d'une découverte publiée 28 ans auparavant par un instituteur, Johann Balmer. En bavardant avec son collègue Hans Hansen, Bohr apprit que Balmer avait trouvé une formule prédisant les raies spectrales émises par l'hydrogène. Lorsqu'un élément est chauffé, il n'émet pas des couleurs continues, mais d'étroites lignes du spectre chromatique. Balmer avait découvert que la fréquence de ces raies correspondait à une formule mathématique simple. Jusque-là, Bohr avait tenu pour acquis que les atomes émettaient de la lumière à des fréquences correspondant au taux de vibration ou de rotation d'un électron, ce qui était la théorie admise à l'époque. Grâce à l'équation de Balmer, Bohr s'est rendu compte que la fréquence de la lumière, reliée à l'énergie des photons grâce à la formule simple de Planck, correspondait aux différents écarts d'énergie entre les orbites d'électrons fixes qu'il avait imaginées. Le nouveau modèle de Bohr expliquait non seulement pourquoi l'atome était stable, mais aussi pourquoi des fréquences de lumière déterminées étaient émises dans son spectre.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

La découverte fortuite d'une ancienne formule a amené Bohr à réaliser que son nouveau modèle atomique expliquait à la fois la stabilité des atomes et l'énergie des photons qu'ils émettent.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Bohr a dit à son collègue physicien Léon Rosenfeld : « Dès que j'ai vu la formule de Balmer, tout est devenu clair dans mon esprit… J'ignorais tout des formules spectrales. J'ai donc fait mes recherches… Et j'ai découvert cette chose si simple au sujet du spectre de l'hydrogène. » Comme la formule se trouvait dans un manuel que Bohr avait utilisé au cours de ses études, il est plausible qu'il l'avait déjà vue, mais c'est la remarque anodine de Hansen qui est à l'origine de la contribution majeure de Bohr à la théorie atomique.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA CATASTROPHE ULTRAVIOLETTE
page 16

L'ATOME DE BOHR
page 24

L'ÉQUATION DE DIRAC
page 60

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

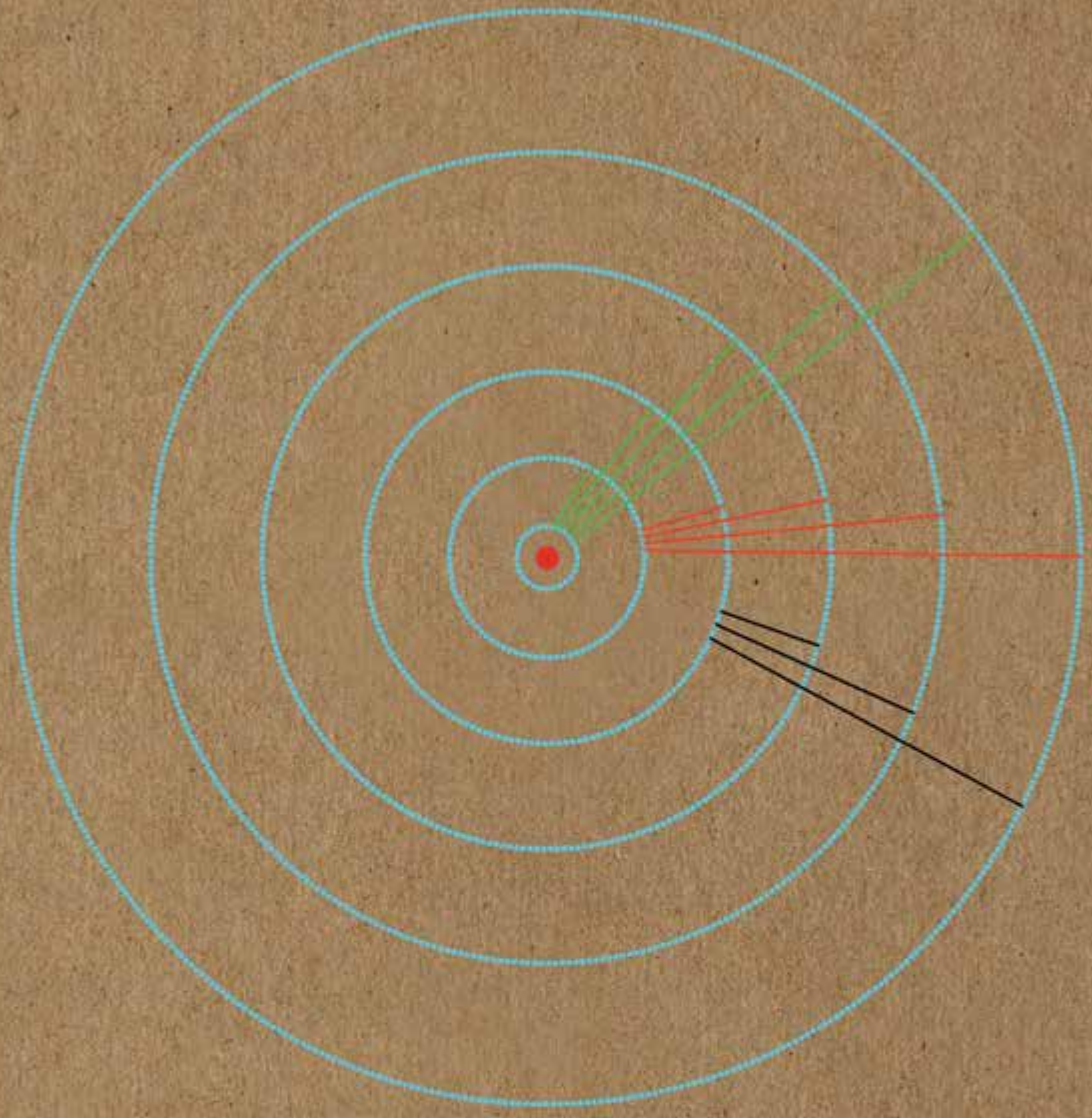
JOHANN JAKOB BALMER
1825–1898
Instituteur suisse qui a aussi enseigné les mathématiques à l'Université de Bâle.

LÉON ROSENFELD
1904–1974
Physicien quantique et historien de la physique moderne d'origine belge qui a défini les leptons, une catégorie de particules.

TEXTE EN 30 SECONDES

Brian Clegg

Si les électrons suivaient une orbite fixe, ils émettraient une lumière de couleurs caractéristiques en passant de l'une à l'autre.



L'ATOME DE BOHR

Théorie en 30 secondes

Quand Niels Bohr est arrivé en

Angleterre en 1911, muni d'une bourse d'études d'un an, on ignorait la structure de l'atome. Après s'être établi à Manchester, où Ernest Rutherford avait son laboratoire, Bohr s'est donné la mission d'élaborer un modèle qui serait conforme à la découverte de Rutherford sur le noyau atomique. Il devait trouver une structure stable permettant aux électrons d'un atome d'exister à l'extérieur du noyau. Bohr a d'abord émis l'hypothèse que les électrons étaient liés au noyau par une sorte d'élastique, et utilisait la théorie des quanta de Planck pour limiter leurs fréquences de vibration possibles, mais l'hypothèse ne correspondait pas aux observations. On savait déjà qu'il n'existait pas de structure stable avec des électrons fixés en place, mais l'autre théorie (selon laquelle les électrons se déplaçaient en suivant une orbite, comme les planètes) entraînait d'autres problèmes. Lorsqu'un corps chargé accélère (comme tout ce qui suit une orbite), il émet un rayonnement électromagnétique. Si les électrons tournaient autour d'un noyau comme des planètes tournant autour du Soleil, ils tomberaient en vrille vers le centre en perdant de l'énergie et seraient détruits. Puisqu'un tel résultat n'était pas évident, Bohr a émis l'hypothèse que les électrons ne pouvaient se déplacer qu'en suivant des orbites fixes et en sautant de l'une à l'autre, sans jamais occuper les espaces entre elles.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Selon ce modèle atomique, Bohr place les électrons sur une trajectoire orbitale, ce qui les empêche de tomber vers le noyau et d'être détruits.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Bohr a été largement influencé par ce qu'il a appelé « le mécanisme de rayonnement proposé par Planck et Einstein », soit l'idée que les atomes ne peuvent émettre de la lumière qu'en paquets distincts ou « quanta ». En plaçant les électrons sur des orbites fixes, il s'assurait que l'énergie qu'ils absorbent en sautant vers un niveau supérieur ou qu'ils émettent en descendant d'un niveau — mouvement connu sous le nom de saut quantique — correspond à l'énergie d'un photon approprié.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LES QUANTA DE PLANCK
page 18

LA SÉRIE PRÉVISIBLE DE BALMER
page 22

L'EPR
page 98

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

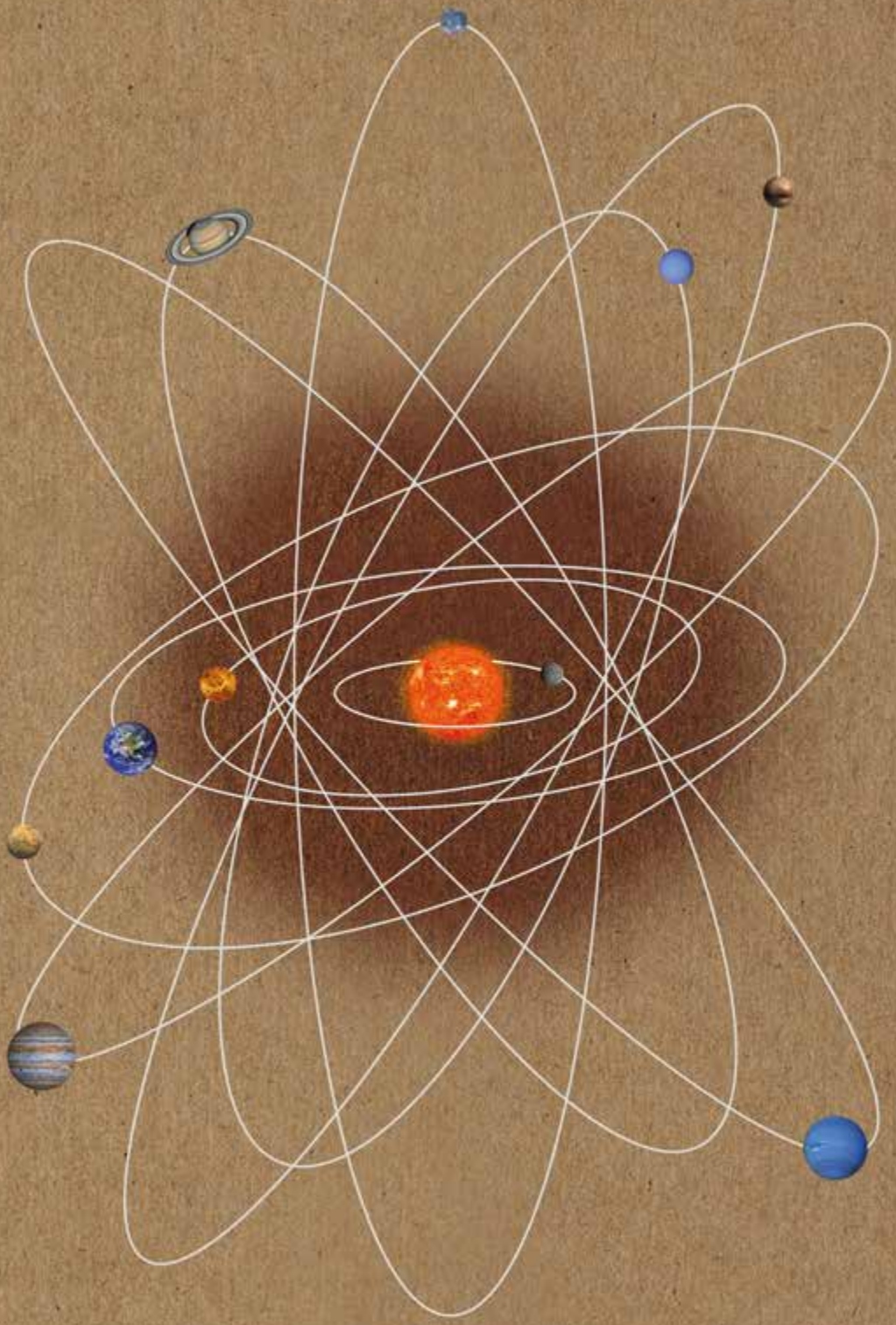
JOSEPH JOHN THOMSON
1856–1940
Britannique qui a découvert l'électron.

ERNEST RUTHERFORD
1871–1937
Néo-Zélandais d'origine qui a découvert la période radioactive et le noyau de l'atome.

TEXTE EN 30 SECONDES

Brian Clegg

À la différence des planètes, les électrons du modèle atomique de Bohr étaient confinés à des orbites données et ne pouvaient occuper l'espace entre ces orbites.



7 octobre 1885
Naît à Copenhague, fils de Christian Bohr, professeur de physiologie danois, et de sa femme Ellen, née Adler, d'origine juive.

1908
Publie dans la revue scientifique *Transactions of the Royal Society* un article sur la tension de surface qui lui mérite un prix.

1911
Obtient son doctorat de l'Université de Copenhague.

1911–1912
Est lancé sur la piste de l'atome quantique lors d'un séjour d'un an à Cambridge et à Manchester, en Angleterre.

1912
Épouse Margrethe Norlund, qui devient sa secrétaire.

1913
Publie le modèle de l'« atome de Bohr ».

1913
Enseigne la physique à l'Université de Copenhague.

1914
Enseigne la physique à l'Université de Manchester.

1916
Devient professeur de physique théorique à l'Université de Copenhague.

1920
Est nommé directeur du nouvel Institut de physique théorique de l'Université de Copenhague.

1922
Reçoit le prix Nobel de physique pour ses travaux sur la structure de l'atome.

milieu des années 1920
Entretient des débats animés avec Einstein à propos de l'« interprétation de Copenhague » née du développement de la mécanique quantique moderne.

1931
Déménage avec sa famille dans la résidence honoraire Carslberg à Valby, Copenhague.

début des années 1930
Commence à s'intéresser au noyau de l'atome.

1943
Échappe à la police allemande en traversant la frontière suédoise, passe au Royaume-Uni et se réfugie aux États-Unis. On le consulte au sujet de la bombe atomique.

18 novembre 1962
Meurt à Copenhague.

1965
L'Institut de physique théorique du Danemark est renommé Institut Niels Bohr.

1997
L'élément 107 est nommé bohrium.

NIELS BOHR

Si impressionnant qu'ait été le doctorat de l'Université de Copenhague de Niels Bohr, la carrière du jeune physicien danois s'est transformée lorsque, en 1911, il est parti étudier un an au Royaume-Uni. Il s'est établi à Cambridge, sous la direction de J. J. Thomson, qui avait découvert l'électron. Si une première rencontre avec Thomson, au cours de laquelle Bohr l'a informé qu'un de ses ouvrages comportait une erreur, a envenimé leurs relations, cela n'a pas empêché Ernest Rutherford de l'inviter peu après à venir le rejoindre à Manchester. Bohr s'est alors inspiré de la découverte du noyau atomique par Rutherford pour élaborer un modèle de structure de l'atome fondé sur la nouvelle théorie quantique.

Bohr pouvait sembler lent d'esprit parce qu'il passait beaucoup de temps à structurer ses idées avant de les exprimer. Un de ses collègues, James Franck, l'a décrit ainsi : « Il avait le visage inexpressif, ses membres pendaient le long de son corps et l'on ne savait même pas s'il pouvait voir. Il avait l'air d'un imbécile. Aucune vie ne s'en dégageait. Puis, tout à coup, on apercevait une lueur monter en lui, une étincelle, et il disait : "Maintenant, je comprends." »

Bohr a été au cœur du développement de la théorie quantique, auprès de Schrödinger, de de Broglie et de Heisenberg. Il a rejeté les réserves d'Einstein sur la nature de cette théorie puissante mais mystérieuse qui explique le comportement des atomes, des électrons et des photons. Einstein détestait cette idée que la probabilité était au cœur de la théorie quantique et tendait des pièges à Bohr lorsqu'ils participaient à des congrès scientifiques. Il préparait des expériences de pensée qui, croyait-il, démontraient les lacunes de sa théorie, mais Bohr réfléchissait généralement au problème pendant une journée, puis trouvait une solution.

Bohr a dirigé pendant de nombreuses années l'Institut de physique théorique de Copenhague, où il faisait des recherches sur la nature de la théorie quantique. Il y a élaboré la notion de « complémentarité », selon laquelle la façon dont les particules quantiques sont mesurées influence inévitablement les résultats. En 1931, il a été invité à s'installer dans la résidence honoraire Carlsberg à Copenhague. Cette villa, qui appartenait à Carl Jacobsen, fondateur de la brasserie Carlsberg, était mise à la disposition de la personne qui apportait les plus grands honneurs au Danemark.

Au milieu des années 1930, Bohr a poussé plus loin le modèle de « goutte liquide » du noyau atomique imaginé par Carl von Weizsäcker, lequel traitait les protons, que l'on venait alors de découvrir, et les neutrons comme un fluide incompressible. Il a ainsi émis des prédictions sur l'énergie de liaison du noyau, prédictions qui allaient être des plus utiles à l'équipe qui a découvert la fission nucléaire. Une dizaine d'années plus tard, Bohr, dont la mère était juive, était menacé dans son pays occupé par les nazis et a dû s'installer au Royaume-Uni, puis aux États-Unis.

LA DUALITÉ ONDE/PARTICULE

Théorie en 30 secondes

En 1905, Einstein a expliqué

l'effet photoélectrique — l'émission d'électrons provenant de surfaces métalliques irradiées de lumière — en tenant pour acquis que la lumière est constituée de particules qui éjectent les électrons des métaux. Einstein a réalisé que ces particules de lumière étaient les quanta découverts par Planck. Toutefois, cette notion de particules de lumière baptisées par la suite photons semblait contredire le comportement ondulatoire de la lumière observé lors de phénomènes tels que la diffraction — la lumière blanche qui se décompose dans les couleurs de l'arc-en-ciel, comme lorsqu'elle est réfléchie par un disque compact — et l'interférence — le fait que deux faisceaux lumineux créés par une lumière passant dans deux fentes s'annulent mutuellement. Cette contradiction a tracassé Einstein jusqu'en 1923, année où Louis de Broglie a postulé que si les photons peuvent se comporter soit comme des particules, soit comme des ondes, il pourrait en être de même des autres particules, comme les électrons. Par la suite, Erwin Schrödinger a fouillé la théorie de Louis de Broglie et en considérant les électrons des atomes comme des ondes, il a calculé la longueur d'onde de la lumière émise. En 1927, George Paget Thomson et Clinton Davisson ont démontré qu'un faisceau d'électrons étroit traversant une mince pellicule métallique ou un cristal se répand dans un motif de diffraction d'anneaux concentriques, prouvant ainsi la théorie de Louis de Broglie.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

En supposant que les particules peuvent se comporter comme des ondes, et réciproquement, de Broglie a résolu un paradoxe qui invalidait la théorie quantique.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

On a découvert qu'il était possible de mesurer les propriétés de la lumière soit comme particules, soit comme ondes. Cette observation est à l'origine du principe de Bohr : la lumière semble être constituée de particules quand son énergie est mesurée, par exemple, dans l'effet photoélectrique, mais ondulatoire dans les expériences sur la diffraction. Le principe de complémentarité, qui englobe le principe d'indétermination d'Heisenberg, a été à la base de l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LES QUANTA DE PLANCK
page 18

L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE SELON EINSTEIN
page 20

L'ATOME DE BOHR
page 24

LES ONDES DE MATIÈRE DE LOUIS DE BROGLIE
page 30

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

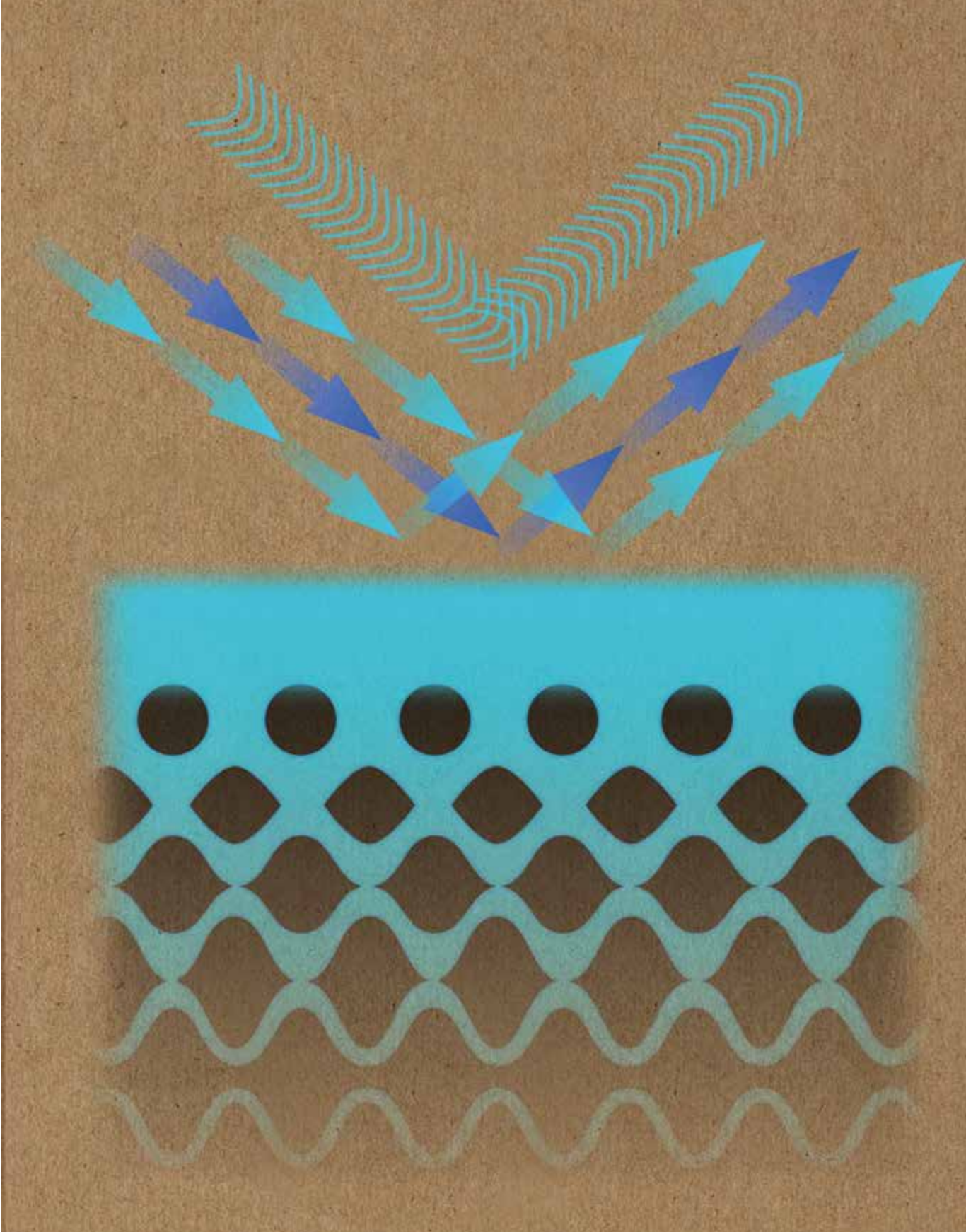
ERWIN SCHRÖDINGER
1887–1961
Physicien autrichien et précurseur de la mécanique ondulatoire.

LOUIS DE BROGLIE
1892–1987
Il a découvert que toutes les particules peuvent se comporter comme des ondes.

TEXTE EN 30 SECONDES

Alexander Hellemans

Selon le processus et la méthode employés pour les mesurer, les quanta peuvent sembler être des ondes ou des particules.



LES ONDES DE MATIÈRE DE LOUIS DE BROGLIE

Théorie en 30 secondes

Si, comme l'avait démontré Einstein, les ondes de lumière pouvaient se comporter comme des particules de matière, les particules de matière pouvaient-elles à leur tour se comporter comme des ondes ? En 1923, Louis de Broglie a voulu le vérifier et a mis au point une théorie des ondes de matière. Selon lui, pour que des particules comme les électrons aient les propriétés des ondes, elles devaient avoir une fréquence et une longueur d'onde — les principales propriétés mesurables des ondes — et générer des figures de diffraction et d'interférence, des phénomènes exclusifs aux ondes. De Broglie a calculé que la longueur d'onde d'une particule dont la masse est connue est proportionnelle à sa vitesse, et que la fréquence de la particule est proportionnelle à son énergie. Son hypothèse a été confirmée par la découverte de la diffraction des électrons lors de deux expériences distinctes : celle de George Thomson au Royaume-Uni et celle des Américains Clinton Davisson et Lester Germer en 1927. Ces deux expériences ont démontré que les électrons dirigés sur une cible solide se comportaient comme des ondes et produisaient de la diffraction. L'expérience de la double fente quantique a confirmé par la suite l'interférence des électrons. Depuis, on a observé des figures de diffraction et d'interférence pour des molécules de plus en plus grosses, certaines l'étant assez pour être observées au microscope électronique.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

De Broglie a démontré que les particules pouvaient se comporter comme des ondes, tout comme les ondes pouvaient se comporter comme des particules.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

La longueur d'onde d'une particule, connue sous le nom de « longueur d'onde de Louis de Broglie », est inversement proportionnelle à l'impulsion de la particule. On peut calculer celle d'un atome, d'une molécule et, en principe, d'un objet beaucoup plus gros, même si celle d'un être humain, par exemple, est trop petite pour être observée parce que sa masse est beaucoup plus considérable que celle d'une particule.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE SELON EINSTEIN
page 20

LA DUALITÉ ONDE/PARTICULE
page 28

LA DOUBLE FENTE QUANTIQUE
page 32

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

CLINTON DAVISSON
1881–1958
Physicien qui a découvert la diffraction des électrons par des cristaux de nickel.

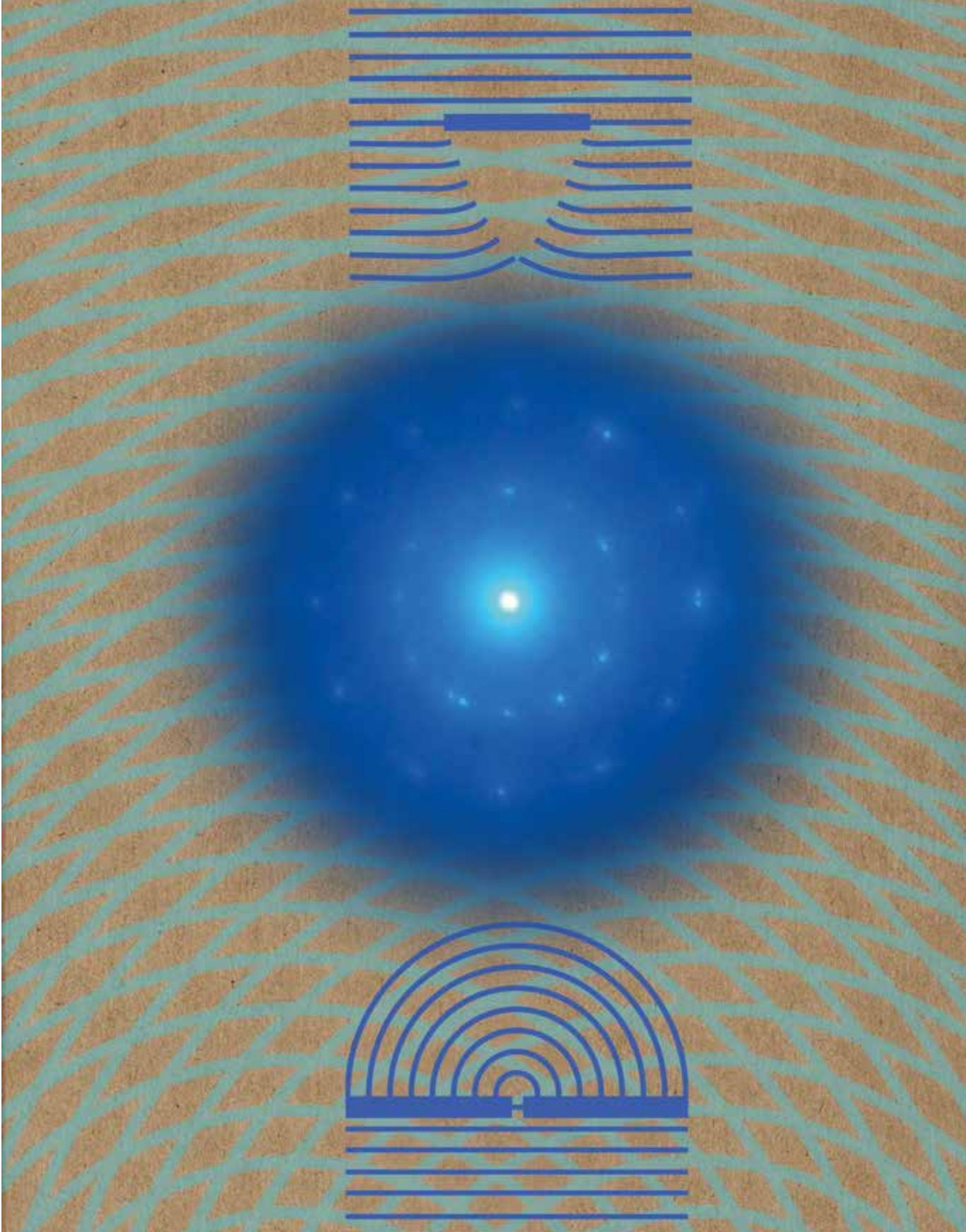
GEORGE PAGET THOMSON
1892–1975
Physicien qui a découvert la diffraction des électrons par une mince pellicule métallique.

LOUIS DE BROGLIE
1892–1987
Physicien français qui a avancé que l'électron avait des propriétés ondulatoires.

TEXTE EN 30 SECONDES

Leon Clifford

Les figures de diffraction des électrons démontrent que ceux-ci se comportent comme des ondes plutôt que comme des particules conventionnelles.



LA DOUBLE FENTE QUANTIQUE

Théorie en 30 secondes

Un siècle avant que Planck et Einstein démontrent que la lumière est émise et absorbée sous la forme de photons semblables à des particules, Thomas Young avait conçu une célèbre expérience qui semblait prouver tout autre chose. Si un faisceau lumineux traverse deux fentes étroites et se projette sur un écran, on pourrait s'attendre à voir simplement deux lignes claires vis-à-vis des fentes. Or, on découvre plutôt un motif composé de plusieurs lignes rapprochées. Ces lignes, appelées franges d'interférence, sont caractéristiques des ondes et non des particules. Pourtant, la lumière frappant l'écran est perçue, comme l'est toujours la lumière, sous forme de photons distincts. L'expérience des fentes de Young démontre de façon percutante la double nature de la lumière : elle se propage comme une onde, mais interagit comme un faisceau de particules. Il en va de même pour la matière : cette expérience produit des résultats identiques avec des électrons. On observe la même figure d'interférence lorsque des électrons sont projetés un à la fois à travers les fentes. Un électron seul se comporte comme une onde qui peut interférer avec elle-même ! Ce résultat étrange, obtenu à la suite d'une « expérience de pensée » décrite de manière célèbre par Richard Feynman comme « le cœur de la mécanique quantique », a depuis été vérifié en laboratoire.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

L'expérience de la double fente démontre la nature fondamentalement double de la lumière qui est à la fois une onde et un faisceau de particules.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Si des détecteurs de photons sont insérés dans le faisceau lumineux pour permettre au chercheur de déterminer par laquelle des deux fentes un photon est passé, la figure d'interférence disparaît et la lumière se comporte comme des particules, et non comme une onde. Dans l'expérience « à choix retardé » de Wheeler, la décision de chercher un comportement corpusculaire ou un comportement ondulatoire se prend après le passage du photon à travers la fente… mais on observe tout de même le comportement que l'on cherchait.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA DUALITÉ ONDE/PARTICULE
page 28

LA RÉDUCTION DE LA FONCTION D'ONDE
page 50

LES DIVISEURS DE FAISCEAU
page 78

L'OPTIQUE QUANTIQUE
page 132

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

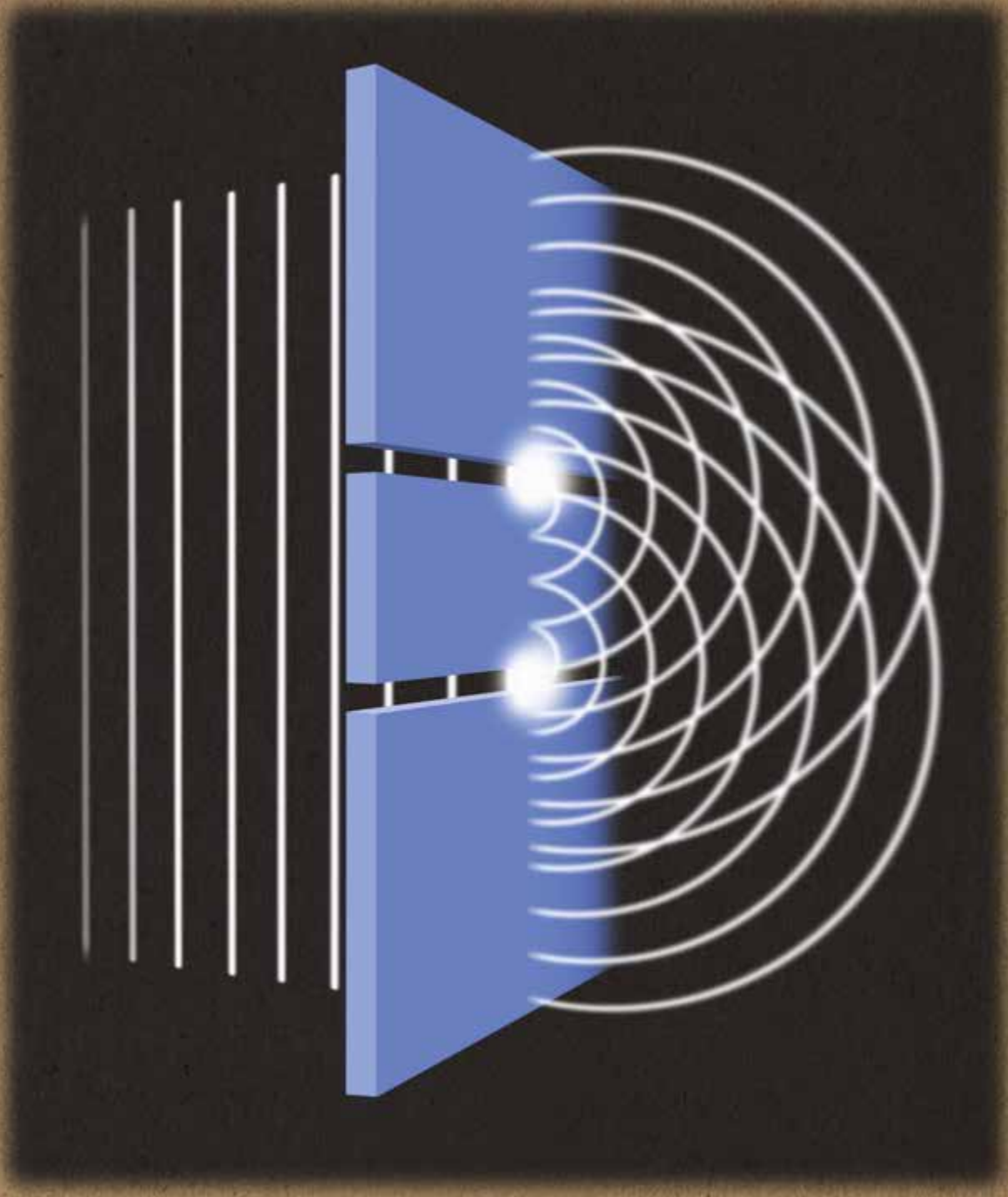
THOMAS YOUNG
1773–1829
Polymathe anglais et brillant pionnier dans une foule de domaines.

RICHARD FEYNMAN
1918–1988
Physicien théoricien américain lauréat d'un prix Nobel et grand vulgarisateur scientifique.

TEXTE EN 30 SECONDES

Andrew May

En général, les ondes devaient produire des interférences lors de l'expérience des doubles fentes.



NOTIONS ESSENTIELLES

NOTIONS ESSENTIELLES
GLOSSAIRE

accélérateur de particules Principal outil de travail des chercheurs en physique des particules, l'accélérateur permet de pousser des faisceaux de particules chargées à une vitesse proche de celle de la lumière, puis de les faire entrer en collision avec d'autres particules ou avec des objets solides, ce qui dégage une multitude de nouvelles particules. Le plus puissant accélérateur de particules construit à ce jour est le Grand collisionneur de hadrons (LHC) du Conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN) situé à la frontière franco-suisse. Le LHC est un tunnel de 27 kilomètres de circonférence qui accélère des faisceaux de protons dans des directions opposées avant de provoquer leur collision.

électrodynamique quantique Généralement connue sous l'abréviation QED, l'électrodynamique quantique est notre théorie sur la façon dont interagissent la lumière et la matière (habituellement un électron). Il s'agit d'une théorie relativiste des champs quantifiés puisqu'elle tient compte de la relativité restreinte, elle est quantifiée et elle représente un champ en imaginant que chaque particule est accompagnée d'une horloge dont les aiguilles tournent rapidement et indiquent la phase d'une particule et la probabilité qu'elle suive un itinéraire particulier.

équation non relativiste Équation qui fait abstraction de la relativité. La deuxième loi de Newton (force = masse x accélération) en est un exemple. Elle est correcte dans le cas des vitesses largement inférieures à la vitesse de la lumière, mais quand la vélocité augmente, les effets relativistes deviennent importants puisque, par exemple, la masse d'un objet augmente avec la vitesse.

espace-temps La relativité considère le temps comme une quatrième dimension. En relativité, il n'existe ni position absolue ni temps absolu, parce que la façon dont les choses se déplacent influence leur position dans le temps. Il importe donc de considérer l'espace-temps comme un tout plutôt que de voir l'espace et le temps comme deux entités indépendantes.

état quantique Ensemble des valeurs des propriétés d'une particule quantique. Un état « pur » possède une valeur spécifique — par exemple, le spin est soit « up », soit « down », soit un mélange des deux, auquel cas le spin pourrait avoir 40 % de probabilité d'être « up » et 60 % d'être « down ».

fonction d'onde En physique quantique, la fonction d'onde est une formule mathématique qui décrit le comportement d'un état quantique de la particule qui, selon l'équation d'ondes de Schrödinger, évolue au fil

du temps. L'onde en question, qui s'étale avec le temps, ne décrit pas la particule elle-même, mais plutôt la probabilité qu'un état quantique possède une valeur donnée. Par exemple, elle peut décrire la probabilité de trouver une particule à différents endroits. La probabilité correspond au carré de la fonction d'onde.

impulsion angulaire L'impulsion est le « oumf » d'un corps en mouvement : la masse multipliée par la vitesse. L'impulsion angulaire est l'équivalent d'un corps en rotation qui combine l'impulsion avec la distance entre le corps et le centre de rotation.

matrice Série de nombres disposés régulièrement. Souvent rectangulaires, les matrices sont de toutes dimensions. Elles servent à résoudre simultanément de multiples équations.

particules virtuelles L'électrodynamique quantique exige des particules virtuelles que l'on ne voit jamais, mais qui participent aux processus quantiques. La force électromagnétique, par exemple, incite un électron à changer de parcours puisqu'il absorbe un photon virtuel. Aussi, dans un espace vide, le principe d'indétermination signifie qu'il est possible que les niveaux d'énergie fluctuent, faisant exister brièvement une paire de particules virtuelles — matière et antimatière — avant de se fondre à nouveau en énergie.

physique classique Ensemble des théories physiques qui prédominaient avant 1900. Les lois du mouvement de Newton constituent un exemple typique de la théorie classique qui a été supplantée par la relativité restreinte, mais donnent encore une bonne approximation pour la plupart des corps en mouvement.

superposition Quand une particule quantique a un état possédant, par exemple, deux valeurs possibles, elle ne possédera pas une valeur réelle, mais plutôt une superposition : une série de probabilités d'être dans certains états, jusqu'au moment où elle est mesurée, ce qui la réduit alors à une valeur réelle. Une pièce de monnaie utilisée pour tirer à pile ou face possède deux états, mais ceux-ci ne sont pas superposés. Avant qu'on la regarde, la pièce possède déjà une de ces valeurs. Par contre, une particule quantique en superposition n'a pas de valeur ; elle n'a littéralement que des probabilités.

variables complémentaires Le principe d'indétermination de Heisenberg associe par paires les propriétés d'une particule quantique. Les paires de variables complémentaires les plus connues sont position-impulsion et énergie-temps. Plus une variable est connue avec précision, moins sa contrepartie l'est.

LE SPIN QUANTIQUE

Théorie en 30 secondes

Le spin quantique est responsable du magnétisme dans notre quotidien. Il s'agit d'une propriété intrinsèque des particules subatomiques, un paramètre clé pour décrire une particule et un des quatre attributs nécessaires pour définir l'état quantique d'un électron dans un atome. Comme tous les éléments de la mécanique quantique, le spin quantique se présente sous la forme de paquets fixes et les particules particulières ne peuvent avoir qu'une certaine quantité de spin, qui est représentée par leur valeur de spin quantique, même si certains peuvent avoir une valeur de spin égale à zéro. Le spin quantique est associé à l'impulsion angulaire, la propriété physique attribuée aux objets en rotation, puisqu'il affecte la mesure de l'impulsion angulaire des atomes. Les effets du spin quantique ont été détectés la première fois relativement aux électrons des atomes. Les électrons qui tournent autour du noyau des atomes transmettent une impulsion angulaire à ces atomes par l'entremise de leur mouvement orbital. Le spin quantique a été découvert en 1922 par les physiciens allemands Otto Stern et Walther Gerlach au cours d'une expérience qui supposait que les électrons des atomes possèdent aussi une impulsion angulaire intrinsèque en plus de celle générée par leur mouvement orbital. Cette théorie évoque un électron tournant sur son axe tout en orbitant autour du noyau atomique.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Le spin quantique est la raison pour laquelle les aimants fonctionnent. Il permet aux scientifiques de distinguer les particules les unes des autres.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

La propriété appelée spin (quantique) a reçu ce nom parce qu'elle possède certaines similitudes avec l'impulsion angulaire classique, mais nous n'avons aucune raison de croire que cela ait un rapport avec la façon dont les particules tournent sur elles-mêmes (ce qui est difficile à imaginer pour une particule ponctuelle comme un électron), particulièrement puisque les valeurs demi-entières du spin sont toujours « up » ou « down », peu importe la direction dans laquelle elles sont mesurées.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LE PRINCIPE D'EXCLUSION DE PAULI
page 58

L'ÉQUATION DE DIRAC
page 60

LA THÉORIE DES CHAMPS QUANTIFIÉS
page 64

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

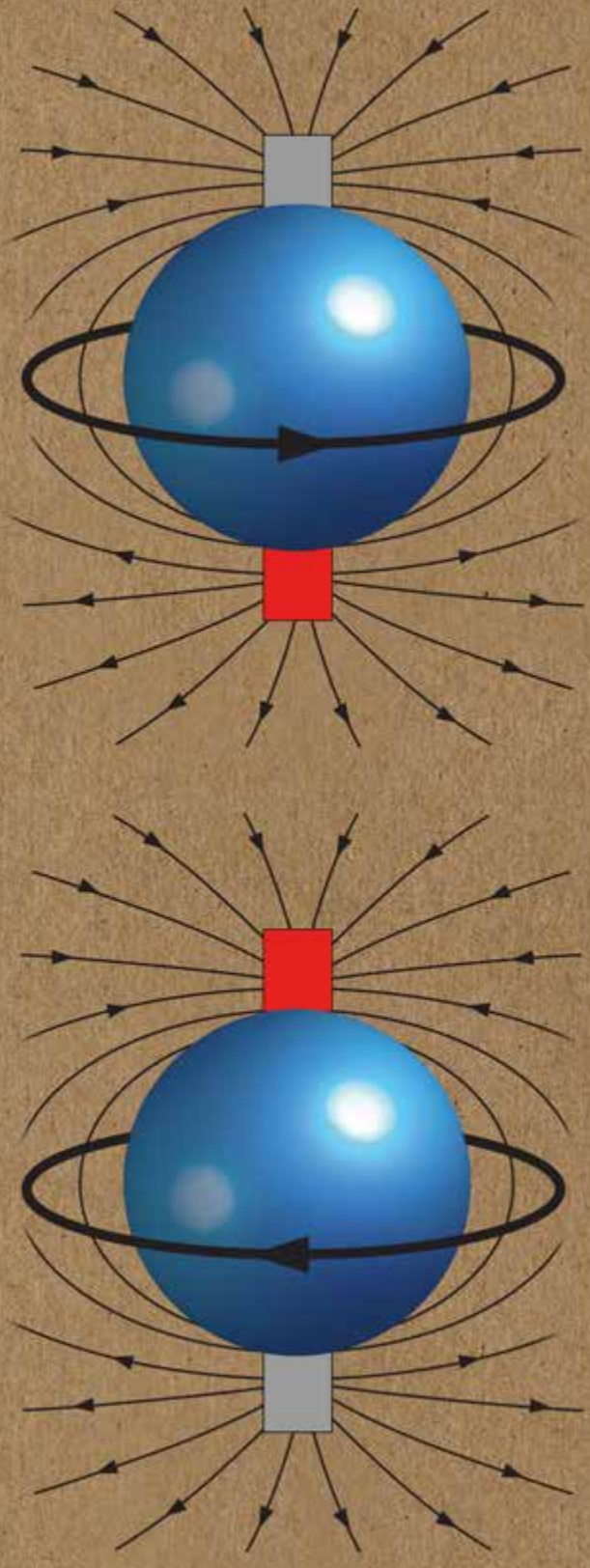
WOLFGANG PAULI
1900–1958
Physicien autrichien innovateur qui a mis au point une grande partie de la théorie sur le spin quantique.

GEORGE UHLENBECK et SAMUEL GOUDSMIT
1900–1988 et 1902–1978
Physiciens néerlandais qui ont coécrit le premier texte sur le spin de l'électron.

TEXTE EN 30 SECONDES

Leon Clifford

La direction du spin quantique des particules détermine leur orientation magnétique.



LA MÉCANIQUE MATRICIELLE

Théorie en 30 secondes

La mécanique matricielle est un moyen de décrire le comportement des systèmes quantiques à l'aide d'une technique mathématique particulière appelée algèbre matricielle. Elle a été mise au point en 1925 par les physiciens allemands Werner Heisenberg, Max Born et Pascual Jordan, qui tentaient de comprendre les règles régissant les spectres atomiques. La mécanique matricielle contraste avec l'approche adoptée par Erwin Schrödinger, qui a utilisé une technique mathématique différente impliquant des équations différentielles pour décrire les systèmes quantiques. L'importance des matrices tient au fait que l'ordre dans lequel les opérations sont effectuées influence le résultat. Au quotidien, la multiplication des nombres produit le même résultat, peu importe leur ordre : 2 x 3 est la même chose que 3 x 2. Ce n'est pas le cas avec les matrices : si la position d'une particule est représentée par une matrice et si l'impulsion de cette particule est représentée par une autre matrice, la multiplication de ces deux matrices donnera des résultats différents selon l'ordre dans lequel se fait l'opération. Ainsi, le résultat de la multiplication de la matrice de position par la matrice d'impulsion est différent de celui de la multiplication de la matrice d'impulsion par la matrice de position. La différence entre ces deux résultats est à l'origine du principe d'indétermination d'Heisenberg.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Le principe qui sous-tend la mécanique matricielle a aidé Heisenberg et ses collègues à introduire le principe d'indétermination dans la mécanique quantique.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Les matrices de Heisenberg ont offert aux physiciens une façon innovatrice de décrire le comportement quantique sans équivalent dans le monde que nous observons. Cela semblait contredire l'approche plus traditionnelle, privilégiée par Schrödinger, qui consistait à utiliser des équations différentielles. C'était une autre manifestation de la dualité onde/particule : les équations différentielles, aux caractéristiques plus régulières, évoquent des ondes, tandis que les matrices ressemblent à des objets individuels. En 1930, ces deux aspects ont été combinés dans le formalisme de Dirac.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER
page 42

LE PRINCIPE D'INDÉTERMINATION D'HEISENBERG
page 48

LA RÉDUCTION DE LA FONCTION D'ONDE
page 50

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

MAX BORN et PASCUAL JORDAN
1882–1970 et 1902–1980
Physiciens allemands qui ont mis au point les aspects mathématiques de la mécanique matricielle.

WERNER HEISENBERG
1901–1976
Pionnier allemand dans le domaine quantique qui utilisait les mathématiques pour révéler la nature incertaine et bizarre du monde quantique.

TEXTE EN 30 SECONDES

Leon Clifford

La mécanique matricielle de Heisenberg avait recours aux mathématiques matricielles pour prédire le comportement quantique.

$$q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & \cdot\cdot \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & \cdot\cdot \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & \cdot\cdot \\ \cdot\cdot & \cdot\cdot & \cdot\cdot & \cdot\cdot \end{pmatrix}; \qquad p = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdot\cdot \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \cdot\cdot \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & \cdot\cdot \\ \cdot\cdot & \cdot\cdot & \cdot\cdot & \cdot\cdot \end{pmatrix}$$

L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER

Théorie en 30 secondes

L'hypothèse formulée en 1924

par Louis de Broglie, à savoir que les particules comme les électrons pouvaient se comporter comme des ondes, a inspiré à Erwin Schrödinger la formulation d'une théorie mathématique de la mécanique quantique où la position et le comportement des particules sont décrits du point de vue de la fonction d'onde ψ (« psi »). Il s'agit d'un type d'onde, mais pas dans le sens d'une onde sonore ou de l'onde de la mer. La fonction d'onde est plutôt une vague de probabilité. Sa valeur (ou plus exactement la valeur du carré de la fonction d'onde : ψ^2) à un point précis dans l'espace indique la probabilité d'y trouver la particule. Les ondes sont décrites mathématiquement par des équations différentielles qui précisent comment l'amplitude des oscillations change au fil du temps. Toutefois, l'équation de Schrödinger est différente des équations d'onde courantes ; elle ressemble davantage aux équations utilisées pour décrire les processus de propagation ou de diffusion. En principe, elle permet aux scientifiques de calculer la fonction d'onde de n'importe quel système quantique (et donc ses positions probables) pourvu que sa masse et son énergie soient connues. En pratique, il est souvent trop difficile de résoudre parfaitement cette équation et l'on n'arrive qu'à des solutions approximatives. L'équation de Schrödinger est le point de départ de toutes les tentatives visant à déterminer la distribution des électrons dans les atomes, les molécules et les matériaux.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

En considérant les particules quantiques comme des « ondes de probabilité », l'équation de Schrödinger permet d'en calculer le comportement.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

La « mécanique ondulatoire » de Schrödinger n'est pas la seule façon de noter mathématiquement la théorie quantique. Tandis que Schrödinger mettait au point son équation, dans les années 1920, Werner Heisenberg développait une façon d'exprimer les états quantiques sous la forme de tableaux de nombres appelés matrices. On se sert encore parfois de sa « mécanique matricielle », mais on préfère généralement les ondes de Schrödinger, parce qu'elles proposent une image plus intuitive de l'« apparence » des états quantiques.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA DUALITÉ ONDE/PARTICULE
page 28

LES ONDES DE MATIÈRE DE LOUIS DE BROGLIE
page 30

LA MÉCANIQUE MATRICIELLE
page 40

BIOGRAPHIE EN 3 SECONDES

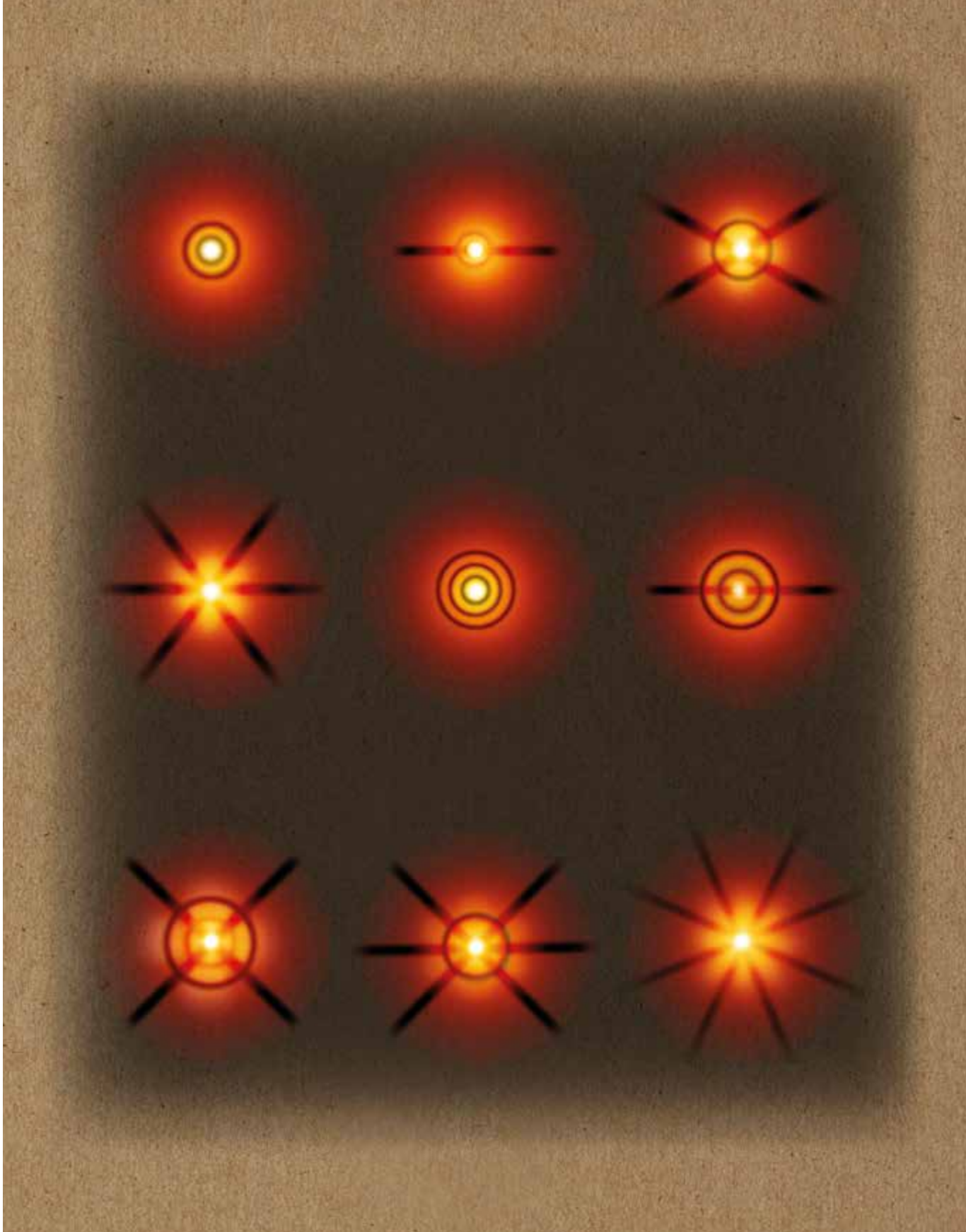
ERWIN SCHRÖDINGER
1887–1961

Physicien autrichien dont les domaines de recherche englobaient la théorie quantique, la cosmologie et la génétique.

TEXTE EN 30 SECONDES

Philip Ball

Les probabilités de localiser l'électron d'hydrogène dans différentes orbites peuvent être prédites par sa fonction d'onde.



12 août 1887
Naît à Vienne, en Autriche.

1910
Reçoit un doctorat de l'Université de Vienne.

1914–1918
Sert comme officier d'artillerie dans l'armée autrichienne lors de la Première Guerre mondiale.

1921
Est nommé professeur de physique théorique à Zurich, en Suisse.

1926
Formule la célèbre équation de Schrödinger, qui pose les fondements de la mécanique ondulatoire.

1927
S'installe à Berlin pour occuper le poste de professeur laissé libre par Max Planck.

1933
Quitte volontairement l'Allemagne nazie et s'établit à Oxford. Reçoit, avec l'Anglais Paul Dirac, le prix Nobel de physique.

1935
Présente sa célèbre théorie connue sous le nom de paradoxe du chat de Schrödinger dans *La situation actuelle en mécanique quantique*.

1939
Nommé directeur de physique théorique à l'Institute for Advanced Studies de Dublin, en Irlande.

1944
L'Université de Cambridge publie son essai *Qu'est-ce que la vie ?*

1956
Prend sa retraite et quitte son poste à Dublin pour rentrer à Vienne.

4 janvier 1961
Meurt à Vienne.

ERWIN SCHRÖDINGER

Erwin Schrödinger est né et a grandi à Vienne. Il était un jeune étudiant brillant qui avait un flair instinctif pour la physique. Lorsqu'il a obtenu son premier poste de professeur permanent à Vienne, dans les années 1920, il croyait déjà fermement que la matière était de nature ondulatoire. Son hypothèse a culminé avec l'élaboration de la théorie de la mécanique ondulatoire, une formulation complète de la théorie quantique qui est généralement considérée comme sa plus grande réussite.

L'équation d'onde de Schrödinger est aussi fondamentale pour la physique quantique que les lois du mouvement de Newton le sont pour la physique classique. La validité mathématique et la capacité en matière de prévision de l'équation de Schrödinger ont été immédiatement reconnues par les autres physiciens, mais il a constaté avec consternation que pratiquement aucun de ses collègues ne partageait son enthousiasme passionné pour les ondes. Selon lui, la « dualité onde/particule » et la « réduction de la fonction d'onde » proposées par l'interprétation de Copenhague, qui prévalait à l'époque et qui était défendue par Niels Bohr, n'étaient que des absurdités pseudo-scientifiques. Soutenu par Einstein, l'un de ses seuls contemporains à partager son point de vue, Schrödinger s'est consacré à concevoir une expérience de pensée qui mettrait en évidence l'absurdité de l'interprétation de Copenhague : le paradoxe du chat de Schrödinger est probablement l'illustration la plus connue de la théorie quantique.

Avant le déclenchement de la Seconde Guerre mondiale, Schrödinger s'est réfugié en Irlande, qui était neutre, pour fuir l'agitation du continent européen. Sa grand-mère maternelle était britannique, et il parlait anglais presque aussi couramment que sa langue maternelle, l'allemand. Éamon de Valera, qui était à l'époque premier ministre d'Irlande, l'a invité personnellement à diriger l'école de physique théorique du tout nouveau Dublin Institute for Advanced Studies. Plus tard, Schrödinger a décrit ses 17 années à Dublin comme les plus heureuses de sa vie. Son ouvrage le plus important de cette période est *Qu'est-ce que la vie* ?, un petit livre révolutionnaire qui démontre comment la théorie quantique et d'autres concepts de physique fondamentale peuvent s'appliquer aux organismes vivants. Lorsque Francis Crick et James Watson ont découvert les secrets de l'ADN, quelques années plus tard, ils ont tous deux reconnu devoir beaucoup à cet écrit de Schrödinger.

Schrödinger menait une vie très différente de celle de ses collègues. Il écrivait de la poésie et s'intéressait à la philosophie et au mysticisme oriental. Fait plus controversé : il a entretenu une flopée de jeunes maîtresses. Ses 3 enfants reconnus sont nés au cours de son union de 40 ans avec sa femme Anni, mais aucun n'est d'elle. Anni, toutefois, semble avoir été résignée devant les infidélités répétées de son époux : elle est demeurée sa femme jusqu'à ce qu'il décède, en 1961, à Vienne. Il avait 73 ans.

LE CHAT DE SCHRÖDINGER

Théorie en 30 secondes

L'illustration la plus célèbre de la façon dont la théorie quantique défie l'intuition est une expérience de pensée proposée en 1935 par Erwin Schrödinger. Selon lui, il était possible de faire en sorte que l'état d'un objet macroscopique — l'état « vivant » ou « mort » d'un chat enfermé dans une boîte, par exemple — dépende d'un événement quantique microscopique, comme la désintégration d'un atome. Il a imaginé un appareil dans lequel la désintégration radioactive d'un atome (un événement quantique attribuable au hasard) relâcherait un marteau qui frapperait une fiole de poison, causant ainsi la mort du chat. Le problème, c'est que l'atome en décomposition peut se trouver dans un mélange d'états appelé superposition, ce qui implique que le chat pourrait être simultanément mort et vivant. En règle générale, les superpositions quantiques sont détruites par la prise d'une mesure de l'objet quantifié. Ainsi, dès que l'on ouvrirait la boîte pour regarder à l'intérieur, le chat serait dans un état ou dans l'autre, mais on ne saurait pas dans quel état il était avant que l'on jette un coup d'œil. Certains croient que quelque chose intervient pour mettre le chat dans un état ou dans l'autre, qu'on le regarde ou pas. D'autres se satisfont d'imaginer une superposition de l'état de mort et de l'état de vie du chat.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

L'expérience de pensée du chat de Schrödinger démontre à quel point la théorie quantique contredit notre vision intuitive : un système quantique qui est simultanément dans deux états détermine si un chat est mort ou vivant.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Pourrions-nous concevoir un test expérimental pour vérifier si le chat de Schrödinger est vivant ou non ? Soutenir une délicate superposition d'états quantique dans un système suffisamment grand pour contenir un vrai chat serait pratiquement impossible, mais un « chat » microscopique — une bactérie ou un virus, par exemple — pourrait plus facilement être isolé des perturbations. Des chercheurs ont proposé une expérience où un virus emprisonné par des faisceaux de lumière laser pourrait être amené dans une superposition quantique.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER
page 42

LA RÉDUCTION DE LA FONCTION D'ONDE
page 50

LA DÉCOHÉRENCE
page 52

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

EUGENE WIGNER
1902–1995
Physicien d'origine hongroise qui a associé au chat de Schrödinger la question de la conscience en postulant la réalisation de l'expérience par un ami en son absence.

JUAN IGNACIO CIRAC
1965–
Physicien espagnol qui a conçu, en s'inspirant du chat de Schrödinger, une expérience faisant appel à des organismes vivants microscopiques.

TEXTE EN 30 SECONDES

Philip Ball

Avant d'être observé, le chat de Schrödinger se trouve dans un état de superposition de deux états : vivant et mort.

LE PRINCIPE D'INDÉTERMINATION D'HEISENBERG

Théorie en 30 secondes

En 1927, le physicien théoricien allemand Werner Heisenberg a élaboré son principe d'indétermination, aussi appelé principe d'incertitude, une propriété fondamentale des systèmes quantiques. Ce principe stipule qu'il est impossible de mesurer simultanément et avec exactitude certaines paires de propriétés physiques (les variables complémentaires) d'un atome ou d'une particule — sa position et son impulsion, par exemple — ou d'être certain de son énergie à un moment précis. Plus la mesure d'une quantité donnée est précise, moins la mesure de l'autre élément de la paire l'est. L'effet de ce phénomène est si minime que l'on peut l'ignorer dans notre quotidien, mais il est considérable pour les particules subatomiques et il est à la base de la mécanique quantique, qui décrit le mouvement et la dynamique des atomes. Cette indétermination est une limite intrinsèque de notre capacité à mesurer des phénomènes naturels à de courtes distances ; elle est une propriété fondamentale de la théorie quantique, pas simplement une lacune de l'appareil de mesure. En conséquence, l'énergie totale d'une particule peut fluctuer dans une certaine mesure (E) pendant une courte période (t), pourvu que le produit de E et de t n'excède pas la constante de Planck divisée par 4π. Ainsi, la loi de conservation de l'énergie peut être contournée pour de très courtes périodes.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Les particules sont comme des politiciens : plus on tente de les épingler, plus vite elles changent de position.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Le principe d'indétermination explique pourquoi les accélérateurs de particules, tel le Grand collisionneur de hadrons, sont aussi vastes. Afin de traiter des distances mille fois plus courtes que la taille d'un proton, il faut des faisceaux de particules dont l'énergie est des trillions de fois plus importante que celle des particules à la température ambiante. Il est donc nécessaire d'avoir d'énormes accélérateurs pour énergiser les faisceaux à de tels extrêmes.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER
page 42

L'ÉQUATION DE DIRAC
page 60

LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN
page 70

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

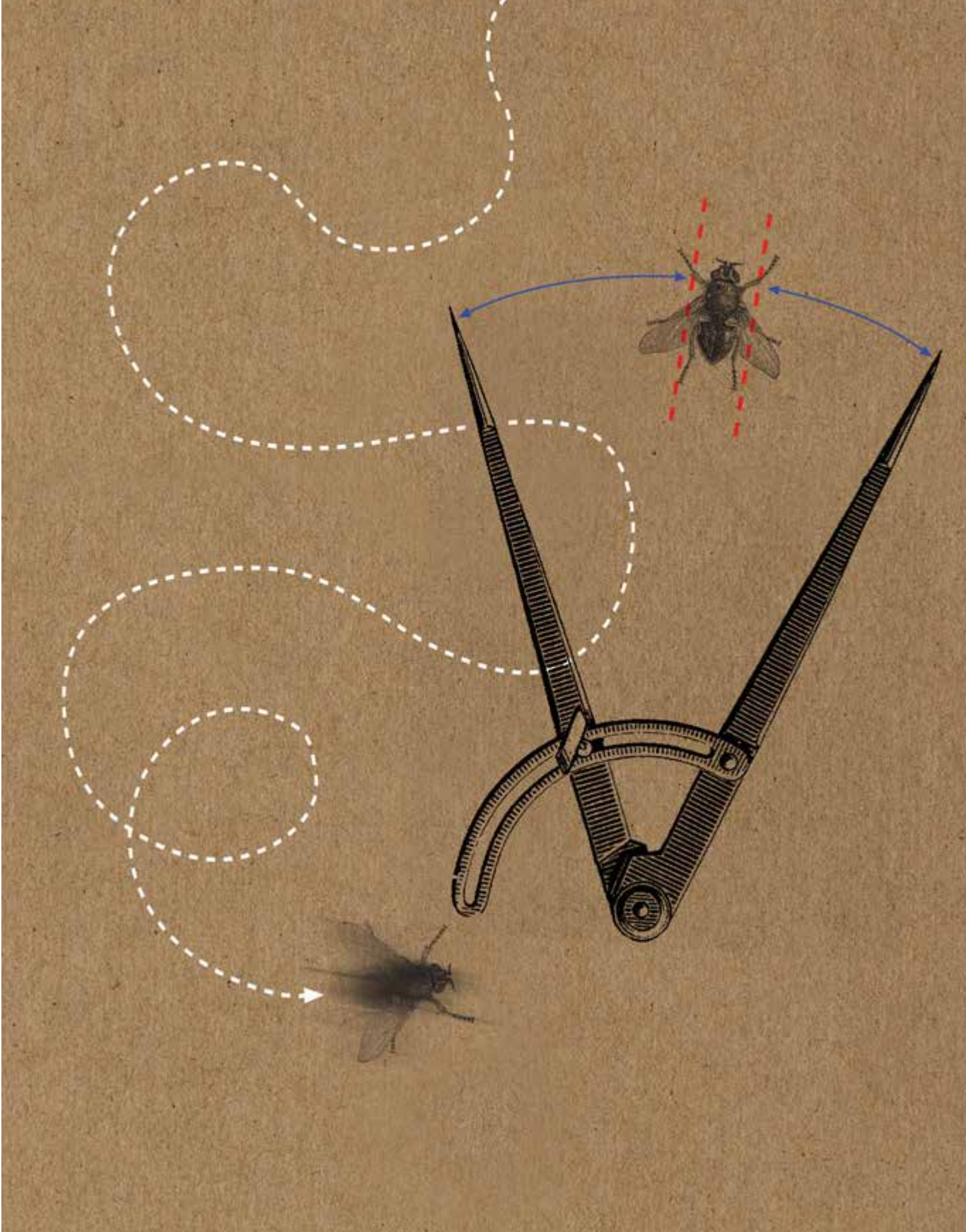
ERWIN SCHRÖDINGER
1887-1961
Physicien autrichien qui a créé une équation non relativiste pour la mécanique quantique ainsi que l'équation tenant compte de la relativité.

WERNER HEISENBERG
1901–1976
Physicien théoricien allemand qui a énoncé le principe d'indétermination.

TEXTE EN 30 SECONDES

Frank Close

Plus nous déterminons avec précision la position d'une particule quantique, moins nous pouvons en apprendre sur son impulsion (et vice versa).



LA RÉDUCTION DE LA FONCTION D'ONDE

Théorie en 30 secondes

L'équation de Schrödinger, qui résume sous la forme d'une fonction d'onde tout ce qu'il y a à savoir sur le système quantique, peut uniquement prévoir les différentes probabilités de le trouver dans un état particulier, alors que la mesure du système donne une seule réponse : nous le trouvons dans un état *ou* dans un autre. Il semblerait que le fait même d'observer le système réduise les possibilités à un seul résultat. C'est ce que l'on appelle la réduction de la fonction d'onde. La manière exacte dont survient la réduction peut dépendre de la méthode utilisée pour prendre la mesure. Ceci fut l'un des principaux chocs philosophiques de la théorie parce qu'elle semblait décrédibiliser la prétendue objectivité de la science : selon toute évidence, l'observateur ne pouvait pas faire autrement qu'influencer le résultat. C'est ce qu'on appelle aujourd'hui le problème de la mesure. Mais cette réduction est-elle une simple formalité mathématique ou un vrai processus physique ? L'interprétation de Copenhague insiste seulement sur le fait que l'état ne peut être connu que lorsqu'on l'observe. Certains croient que la réduction de la fonction d'onde est une illusion, puisque tous les résultats possibles sont réalisés dans des mondes différents. Selon d'autres, la réduction est un processus comme la désintégration radioactive : elle obéit à un échéancier déterminé et pourrait impliquer la force de gravitation, ce qui constituerait le lien longtemps recherché entre la gravité et la théorie quantique.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

La réduction de la fonction d'onde transforme la superposition d'états quantiques en un seul état, généralement lorsque l'on prend la mesure de l'état du système.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Le physicien américain David Bohm a proposé une autre interprétation de la réduction de la fonction d'onde en se basant sur la théorie de l'onde pilote de Louis de Broglie selon laquelle les particules quantiques sont accompagnées et guidées par des ondes (ondes de matière). Elle suppose qu'il y a une seule fonction d'onde qui dirige tout l'univers (ainsi, tout dépend de tout) et qui en fait ne se réduit jamais, mais semble le faire en certains endroits en raison de la décohérence qui agit entre la fonction d'onde locale et celle du reste de l'univers.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER
page 42

LE CHAT DE SCHRÖDINGER
page 46

LA DÉCOHÉRENCE
page 52

LA RÉDUCTION PAR LA CONSCIENCE
page 90

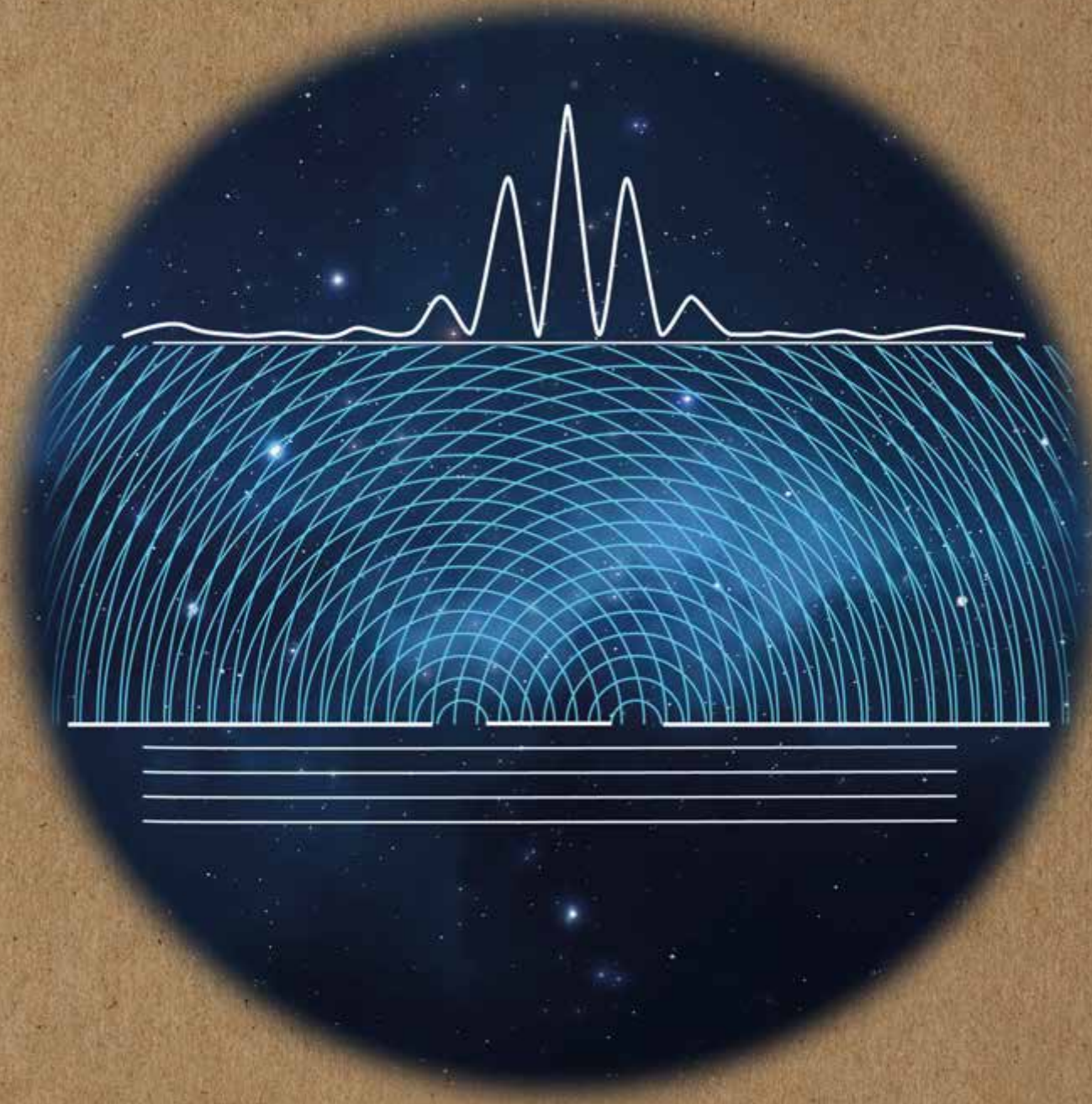
BIOGRAPHIE EN 3 SECONDES

ROGER PENROSE
1931–
Physicien mathématicien britannique qui a proposé que la réduction de la fonction d'onde est le résultat de la courbure de l'espace-temps en relativité générale.

TEXTE EN 30 SECONDES

Philip Ball

Dans un système quantique tel le processus de la double fente, les particules existent comme une vague de probabilité, elles causent de l'interférence et d'autres effets. Lorsqu'on les observe, tout cela est réduit à une seule valeur.



LA DÉCOHÉRENCE

Théorie en 30 secondes

L'univers microscopique est régi par des règles quantiques, mais dans le quotidien, dans le monde des boules de billard et des théières, c'est la physique classique qui s'applique. Comment la physique quantique devient-elle classique ? Où se cache alors la bizarrerie quantique ? L'opinion générale est que les effets quantiques, comme le comportement ondulatoire des particules, sont « dilués » par les interactions entre les particules quantiques et leur environnement ; on appelle ce phénomène la décohérence. Ces interactions signifient qu'une particule et son environnement s'« enchevêtrent » : les propriétés de la particule ne sont plus intrinsèques, mais dépendent de l'environnement. Pour observer un comportement quantique dans un système, il faut supprimer la décohérence en isolant le plus possible le système de son environnement. C'est la raison pour laquelle les effets quantiques comme la superposition s'observent, en général, uniquement en laboratoire : ils sont fragiles et facilement détruits par la décohérence. Cette dernière est un processus à sens unique : une fois qu'elle a effacé le caractère quantique, on ne peut pas le récupérer. Le taux de décohérence augmente exponentiellement tandis que les particules dans le système se multiplient. Ainsi, la transition quantique/classique est presque instantanée dans le cas de gros objets. La décohérence fait donc du passage de quantique à classique un processus bien défini qui dépend de conditions environnementales précises.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

La décohérence est la perte du comportement quantique causée par les interactions de ses particules constituantes avec leur environnement.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Quelle taille peut atteindre un système quantique avant que la décohérence devienne irrépressible et que le système se comporte de manière classique ? Certaines grosses molécules telles que le C60, qui contient 60 atomes, peuvent manifester des effets d'interférence quantique de type ondulatoires, mais ceux-ci peuvent être estompés si l'on fait circuler les molécules dans un gaz afin que les collisions provoquent la décohérence. Bientôt il sera possible de détecter les superpositions quantiques d'états vibratoires dans de minuscules faisceaux oscillatoires visibles au microscope électronique.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LE CHAT DE SCHRÖDINGER
page 46

LA RÉDUCTION DE LA FONCTION D'ONDE
page 50

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

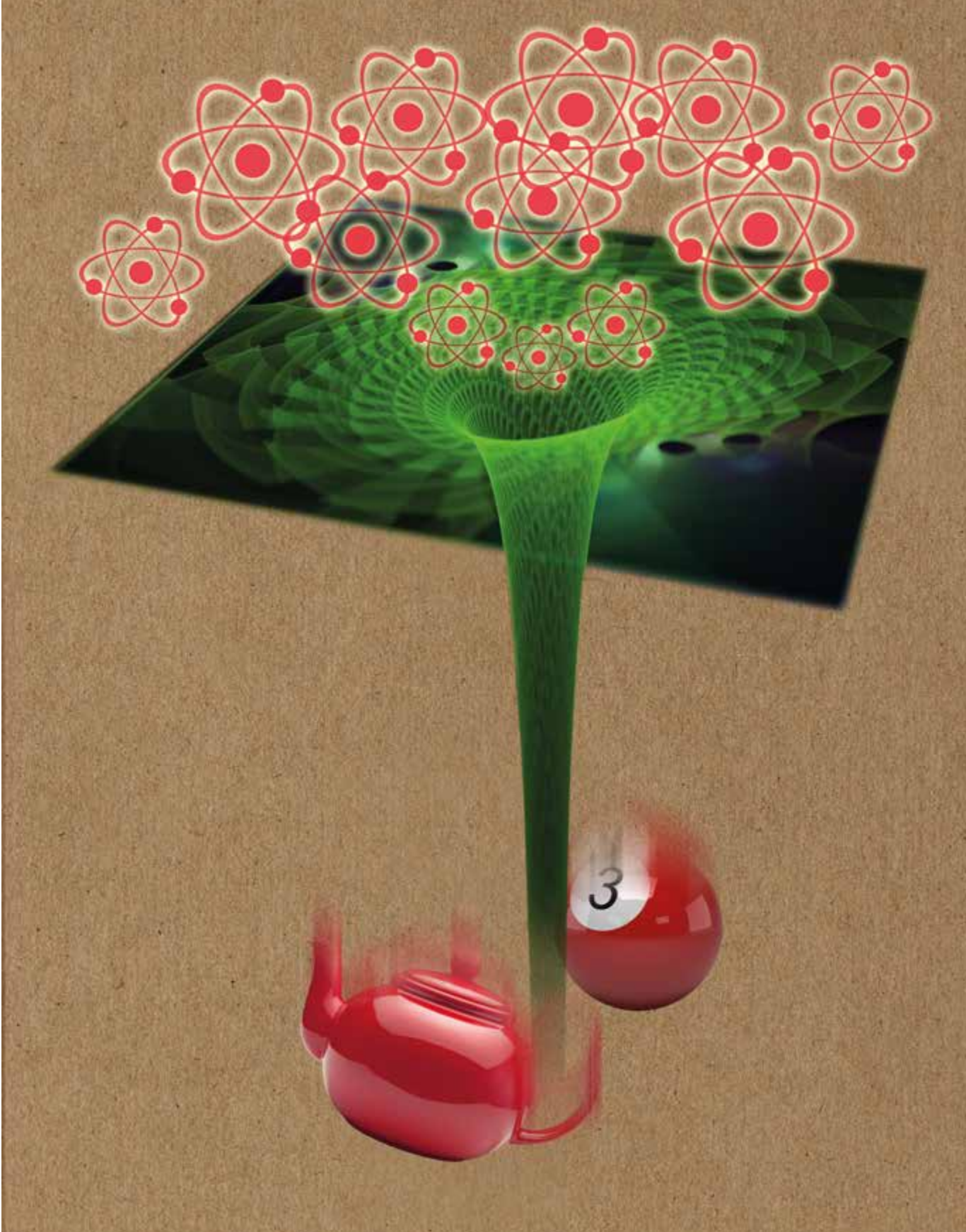
HEINZ-DIETER ZEH
1932–
Physicien allemand qui a déterminé l'origine de la décohérence en 1970.

WOJCIECH ZUREK
1951–
Physicien américano-polonais qui a expliqué comment la décohérence « choisit » certaines propriétés classiques dans la palette d'états quantiques possibles.

TEXTE EN 30 SECONDES

Philip Ball

Les particules quantiques ont des états superposés, mais la décohérence assure que les objets du quotidien demeurent résolument classiques.


3

PHYSIQUE DE LA LUMIÈRE ET DE LA MATIÈRE

PHYSIQUE DE LA LUMIÈRE ET DE LA MATIÈRE
GLOSSAIRE

antimatière Paul Dirac a prédit que l'électron devrait normalement avoir un double chargé positivement, appelé plus tard positron. Cette prédiction s'est confirmée : c'était le premier exemple d'une particule d'antimatière. Ensuite, on a découvert que toutes les particules de matière obéissaient au même phénomène. Quand l'énergie se convertit en matière, elle crée une paire d'équivalents matière-antimatière qui peuvent se recombiner, fusionnant en énergie.

boson Particule conforme à la statistique de Bose-Einstein. D'habitude, les bosons sont des particules porteuses d'énergie, comme les photons et le célèbre boson de Higgs, mais le terme s'applique également aux noyaux atomiques comportant un nombre pair de particules. Plusieurs bosons peuvent être dans un même état au même moment.

champ (champ quantique) Construction mathématique emplissant tout l'espace-temps, où chaque emplacement est marqué d'une valeur (un peu comme une carte tridimensionnelle de la Terre, où n'importe quel point au-dessus du niveau de la mer est la valeur du champ). Un champ est dit quantique quand il provoque les mêmes effets que les objets quantiques susceptibles d'être dans un état de superposition d'états, ce qui oblige à avoir recours à une mathématique plus complexe que celle exigée par un champ classique comme une carte de la Terre.

constante de structure fine Une des constantes fondamentales de la physique, d'une valeur approximative de $1/137$. La constante de structure fine (a) reflète la force de l'attraction électromagnétique et contrôle la manière dont les électrons lient entre eux atomes et molécules.

coquille d'électron Les électrons dessinent seulement des orbites fixes autour de l'atome, avec des sauts entre les orbites impliquant le plus souvent l'absorption ou l'émission d'un photon (ce phénomène est la quantification de l'électron). Les niveaux d'orbite possibles sont parfois appelés coquilles, surtout en chimie. Chaque coquille contient un nombre maximal d'électrons (2 pour la première, 8 pour la deuxième, 18 pour la troisième, etc.).

espace-temps La relativité considère le temps comme une quatrième dimension. En relativité, il n'existe ni position absolue ni temps absolu, parce que la façon dont les choses se déplacent influence leur position dans le temps. Il importe donc de considérer l'espace-temps comme un tout plutôt que de voir l'espace et le temps comme deux entités indépendantes.

étoile à neutrons Ce qui reste après l'effondrement d'une vieille étoile dont la masse était 1,4 à 3,2 fois celle du Soleil. Une étoile à neutrons est essentiellement un amas de neutrons d'une formidable densité :

un morceau de la grosseur d'un raisin pèserait environ 100 millions de tonnes.

fermion Un des deux principaux types de particule (l'autre étant le boson). Les particules de matière (électrons, quarks, protons et neutrons) et les neutrinos sont des fermions. Les fermions respectent la statistique de Fermi-Dirac et le principe d'exclusion de Pauli (voir p. 58), selon lequel il ne peut y avoir plus d'un fermion dans un état identique.

mécanique ondulatoire Une des premières formulations de la théorie des quanta, par Schrödinger, qui considérait les particules comme des « ondes de matière ». L'onde elle-même, décrite dans l'équation de Schrödinger, a été interprétée par Max Born comme représentant une probabilité plutôt qu'une position. Il a été prouvé qu'elle est équivalente à la mécanique matricielle.

mécanique matricielle Une des premières formulations de la théorie des quanta, par Heisenberg, qui ne tentait pas d'en présenter une illustration imagée, mais prédisait simplement ce qu'on observerait comme conséquence des valeurs changeantes d'une série de nombres dans le temps.

neutron Particule de charge neutre composée de trois quarks et que l'on trouve dans le noyau des atomes. Pour un élément donné, il peut exister des variantes, appelées isotopes, dont le noyau contient diverses quantités de neutrons.

nombre quantique Chacune des valeurs des états quantiques d'une particule qui peut seulement prendre des valeurs entières ou demi-entières. On décrit l'électron d'un atome à l'aide de quatre nombres quantiques : le niveau d'énergie, le moment angulaire, le moment magnétique et le spin.

onde inversée dans le temps Les équations de Maxwell décrivant l'électricité et le magnétisme avancent deux solutions : l'onde va de l'émetteur au récepteur en avançant dans le temps (ondes retardées), et du récepteur à l'émetteur en reculant dans le temps (ondes avancées). Les ondes inversées dans le temps sont utiles pour expliquer certains problèmes mathématiques par la façon qu'a l'électron de reculer au moment de l'émission d'un photon.

positron Autre nom de l'antiélectron, l'antimatière chargée positivement et équivalente à un électron.

série divergente Série dont la somme est infinie. $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} \ldots$ est une série divergente. À l'inverse, une série convergente a une somme finie. Le total de $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \ldots$ est simplement 2, même s'il contient un ensemble infini de fractions, car chaque élément subséquent rapproche le total de 2, sans jamais le dépasser.

LE PRINCIPE D'EXCLUSION DE PAULI

Théorie en 30 secondes

En 1913, Niels Bohr a expliqué comment des atomes émettent ou absorbent des photons de longueurs d'onde bien précises lorsque les électrons qui encerclent le noyau sautent d'une orbite à l'autre dans un ensemble d'orbites fixes. On assigne à ces orbites des nombres quantiques entiers (1, 2, 3, etc.) appelés nombres quantiques principaux. Ce modèle a été jugé valide pour l'hydrogène, l'atome connu le plus simple de tous, mais il n'explique pas l'apparition de longueurs d'onde inattendues dans les spectres des atomes plus complexes. En 1915, le physicien allemand Arnold Sommerfeld a démontré qu'un deuxième nombre quantique, la constante de structure fine, pouvait expliquer ces longueurs d'onde. Dans un champ magnétique, les électrons se comportent aussi comme de petits aimants et, comme ils sont aussi dotés d'un spin, les physiciens ont dû ajouter un troisième, puis un quatrième nombre quantique. L'énergie de chaque électron est déterminée par ces nombres quantiques. La même année, Wolfgang Pauli a découvert qu'aucun électron doté du même ensemble de quatre nombres quantiques ne peut orbiter autour du même atome. Ce concept, nommé principe d'exclusion de Pauli, explique pourquoi, même quand l'atome est dans son état d'énergie le plus bas, les électrons se répartissent dans plusieurs coquilles (orbites ayant le même nombre quantique principal), et cette répartition explique les propriétés chimiques des éléments.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Le principe d'exclusion de Pauli explique pourquoi, dans les atomes, les électrons se répartissent toujours sur plusieurs orbites au lieu d'occuper le niveau d'énergie le plus bas.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Puisque les électrons occupent plusieurs coquilles autour du noyau atomique et ne peuvent être confinés dans une seule, les atomes ont une taille minimum et ne peuvent être serrés les uns contre les autres. Les neutrons et les électrons sont des fermions et ont un spin demi-entier. Comme tous les fermions répondent au principe de Pauli, les neutrons des étoiles à neutrons ne peuvent fusionner, ce qui empêche ces étoiles de s'effondrer davantage sous l'effet des forces gravitationnelles résultant d'une telle condensation de la matière.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'ATOME DE BOHR
page 24

L'INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE
page 84

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

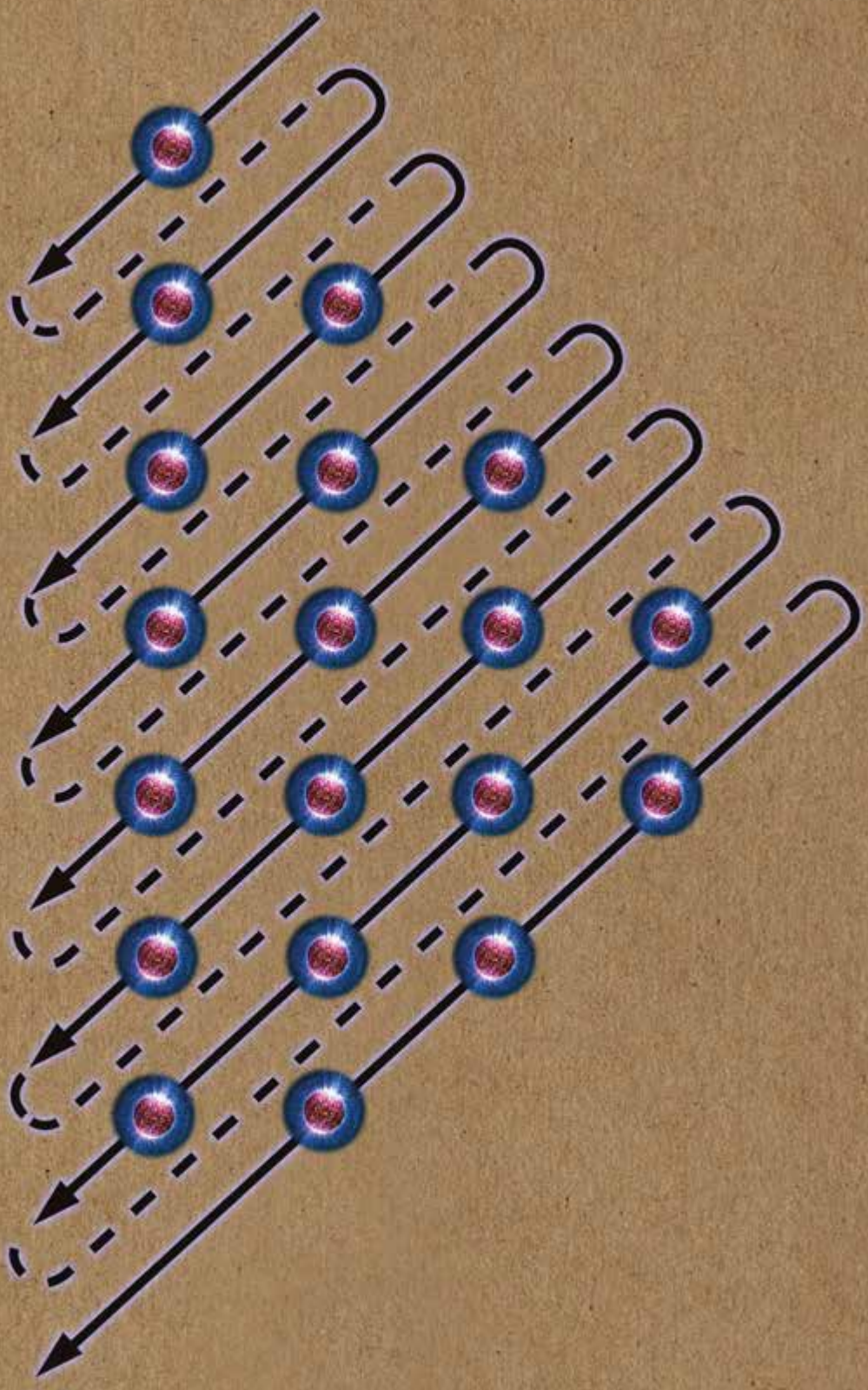
NIELS BOHR
1885–1962
Pionnier danois de la théorie quantique qui a conçu le premier modèle de l'atome.

WOLFGANG PAULI
1900–1958
Physicien théoricien autrichien qui a inventé le principe d'exclusion qui porte son nom.

TEXTE EN 30 SECONDES

Alexander Hellemans

Le principe d'exclusion de Pauli a résolu une énigme : pourquoi les éléments dotés de propriétés chimiques similaires sont-ils disposés en colonnes dans le tableau périodique des éléments ?



L'ÉQUATION DE DIRAC

Théorie en 30 secondes

En 1913, Niels Bohr a suggéré que les spectres atomiques apparaissent quand les atomes émettent et absorbent des longueurs d'onde différentes, lorsque les électrons sautent d'une orbite à l'autre. Le problème était que les mesures des noyaux atomiques de l'hydrogène ne concordaient pas totalement avec la théorie de Bohr. C'est pourquoi, à l'été de 1927, le spécialiste britannique de la physique théorique Paul Dirac s'est penché sur le problème, bien décidé à résoudre le casse-tête causé par le comportement de ces électrons. À cette fin, il a combiné les équations de la mécanique quantique ondulatoire d'Erwin Schrödinger et la description mathématique des particules atteignant presque la vitesse de la lumière, abordée dans la théorie de la relativité restreinte. D'autres physiciens avaient tenté cette approche, mais ils étaient tombés sur un os : comment intégrer le spin bien connu des électrons dans une structure aussi « relativiste » ? Dirac a résolu le problème en utilisant une algèbre astucieuse et en incorporant à l'équation des matrices 4 x 4. Le résultat fut une équation quantique ondulatoire « relativiste », aujourd'hui appelée l'équation de Dirac, qui résolvait à la fois la question des électrons de charge négative et celle des électrons de charge positive, annonçant l'existence de l'antimatière. Cette brillante idée de Dirac a imposé la théorie des champs quantifiés, qui est à la base de la physique moderne des particules.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Pour mettre au point son équation, Paul Dirac a dû combiner la physique de l'infiniment petit et celle de l'infiniment rapide.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

La vraie signification de l'équation de Dirac va peut-être au-delà de la théorie des champs quantifiés, puisqu'un élément de la mathématique pure venait de prédire avec exactitude l'existence d'une nouvelle particule fondamentale. L'électron de charge négative de Dirac pouvait équivaloir à un électron de charge positive. La découverte par Carl Anderson, en 1932, d'une particule réelle correspondant à sa description indique peut-être que les mathématiques sont intimement liées à la structure même de l'univers.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'ATOME DE BOHR
page 24

LE SPIN QUANTIQUE
page 38

L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER
page 42

LA THÉORIE DES CHAMPS QUANTIFIÉS
page 64

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

WILLIAM CLIFFORD
1845–1879
Mathématicien britannique qui a inventé l'algèbre utilisée plus tard par Dirac.

CARL ANDERSON
1905–1991
Chercheur américain qui a découvert des antiélectrons dans les rayons cosmiques.

TEXTE EN 30 SECONDES

Leon Clifford

Dirac a donné à la relativité un cadre permettant d'harmoniser la théorie et les spectres atomiques observés.

8 août 1902
Naît à Bristol d'un père suisse enseignant et de Florence, née Holten, libraire cornouaillaise.

1921
Obtient un diplôme d'ingénieur de l'Université de Bristol.

1923
Obtient un diplôme de mathématiques de l'Université de Bristol et entreprend un doctorat à Cambridge.

1926
Devient chargé de cours au St John's College de Cambridge.

1928
Conçoit l'équation de Dirac, qui décrit le mouvement relativiste d'un électron.

1930
Imagine une « mer » infinie d'électrons de charge négative et prédit l'existence de l'antimatière.

1930
Est élu Membre de la Société Royale.

1932
L'électron de l'anti-matière, prédit par Dirac, est découvert par Carl Anderson, de l'Institut de technologie de Californie.

1932–1969
Détient le titre de professeur lucasien de mathématiques de l'Université de Cambridge.

1933
Reçoit le prix Nobel de physique (avec Schrödinger) pour ses découvertes en théorie atomique.

1937
Épouse Margit (« Manci ») Wigner, la sœur du physicien Eugene Wigner.

1952
Reçoit la médaille Copley et la médaille Max Planck.

1969
Prend sa retraite et occupe le poste de professeur honoraire de l'Université publique de Floride.

20 octobre 1984
Meurt à Tallahassee, en Floride.

1995
Un mémorial lui étant dédié est inauguré à l'abbaye de Westminster.

PAUL DIRAC

Paul Dirac est le plus grand scientifique resté quasi inconnu hors de la communauté de ses pairs. Né à Bristol d'un père suisse et d'une mère britannique, Paul Dirac a reçu une éducation très stricte. On raconte que sa nature taciturne venait de ce que son père lui avait interdit de lui adresser la parole dans une autre langue que le français le plus châtié : pour ne pas commettre d'erreurs, Dirac aurait décidé de se taire. Or, plusieurs signes indiquent que Dirac aurait plutôt été atteint d'un certain degré d'autisme.

Dirac a commencé ses études en génie électrique à l'Université de Bristol, mais son intérêt croissant pour la mathématique appliquée l'a fait opter pour un deuxième diplôme avant d'aller à Cambridge, où il a très tôt travaillé sur la relativité et un nouveau sujet très en vogue, la physique quantique. Là, il s'est attelé à l'équation déjà très prometteuse de Schrödinger, décrivant la probabilité de trouver une particule donnée en n'importe quelle position, et il a étendu l'équation au domaine de la relativité restreinte pour certains types de particules, prenant en compte les effets potentiels d'un mouvement à haute vitesse.

L'équation de Dirac était symétrique : elle acceptait des particules de charge tant positive que négative. Grave problème, car l'électron ordinaire avait toutes les chances de plonger dans des états de charge négative encore plus basse, et donc de libérer une multitude de photons. La solution spectaculaire mise de l'avant par Dirac : l'espace soi-disant vide contiendrait une « mer » d'électrons de charge négative remplissant tous les états de charge négative potentielle et protégeant chaque électron de la désintégration. Il a prédit que cette mer pouvait contenir des « trous », des électrons de charge négative manquants, qui équivaudraient à des antiélectrons de charge positive, aussi appelés positrons. Dirac a donc prévu l'existence de l'antimatière avant qu'elle soit découverte. Il a aussi contribué à une avancée majeure qui a marqué la théorie quantique : en prouvant que la mécanique matricielle d'Heisenberg et la mécanique ondulatoire de Schrödinger, apparemment indépendantes, n'étaient pas seulement cohérentes mais équivalentes, et en liant les deux, il a donné naissance à la mécanique quantique.

Certains traits de personnalité de Dirac faisaient penser à l'un de ses prédécesseurs à la chaire qu'il occupait à Cambridge, le professeur lucasien de mathématiques Isaac Newton. Comme ce dernier, Dirac était socialement empâté ; tristement célèbre pour son incapacité à communiquer avec son entourage, même pour échanger des banalités, il répondait brièvement aux questions qu'on lui posait. On a beaucoup parlé de ses tentatives d'entrer en contact avec les gens, en particulier quand il faisait face au très engageant physicien et théoricien américain Richard Feynman. On raconte qu'un jour, à la suite d'un des longs silences devenus sa marque de commerce, il a dit : « J'ai une équation. En avez-vous une, vous aussi ? » Personne ne peut toutefois nier son génie mathématique.

LA THÉORIE DES CHAMPS QUANTIFIÉS

Théorie en 30 secondes

La théorie des champs quantifiés est à la base de la physique moderne des particules, et le fondement mathématique de notre compréhension de ce qu'est la réalité. Elle s'appuie sur la mécanique quantique en élargissant le champ d'étude d'une poignée de particules à un système comportant un très grand nombre de particules. Elle décrit le comportement des champs – des quantités physiques dont chaque point dans l'espace est marqué d'une valeur, un peu comme sur une carte topographique –, tels que le champ électromagnétique, qui rend possible l'émission d'ondes radio ou lumineuses, au niveau quantique, mais d'une façon impossible à reproduire en mécanique quantique. Elle est d'une aide cruciale aux physiciens, leur permettant de s'occuper à la fois des champs et des particules au niveau quantique à partir d'un même ensemble cohérent d'équations. Cette théorie présente les ondes et les particules comme des sortes de parasites perturbant un champ sous-jacent. La lumière, par exemple, est une oscillation dans un champ magnétique, et l'électron est l'état d'un champ électromagnétique particulièrement excité. La théorie explique ainsi clairement la dualité onde/particule que l'on trouve dans la nature, en combinant l'aspect onde et particule de la lumière et des électrons – sans parler des autres combinaisons de forces et de particules – en une seule description mathématique d'un champ.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

La théorie des champs quantifiés vise à décrire, sur le plan de l'interaction de ces champs, toutes les forces et toutes les particules trouvées dans la nature.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

À ce jour, la théorie des champs quantifiés a été incapable de donner une description quantique vraiment cohérente de la gravité (pesanteur). L'inclusion réussie de la gravité mènerait à une théorie de champ unitaire combinant toutes les forces et les particules connues qui composent et forment notre monde. Pareille découverte nous rapprocherait un peu plus d'une « théorie ultime de toute chose ».

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA DUALITÉ ONDE/PARTICULE
page 28

LA CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE
page 148

LA GRAVITÉ QUANTIQUE
page 152

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

MARTINUS VELTMAN
1931–

Physicien hollandais qui a aidé à combiner l'énergie nucléaire faible à l'électrodynamique quantique, devenant ainsi l'un des pionniers de la théorie des champs quantifiés.

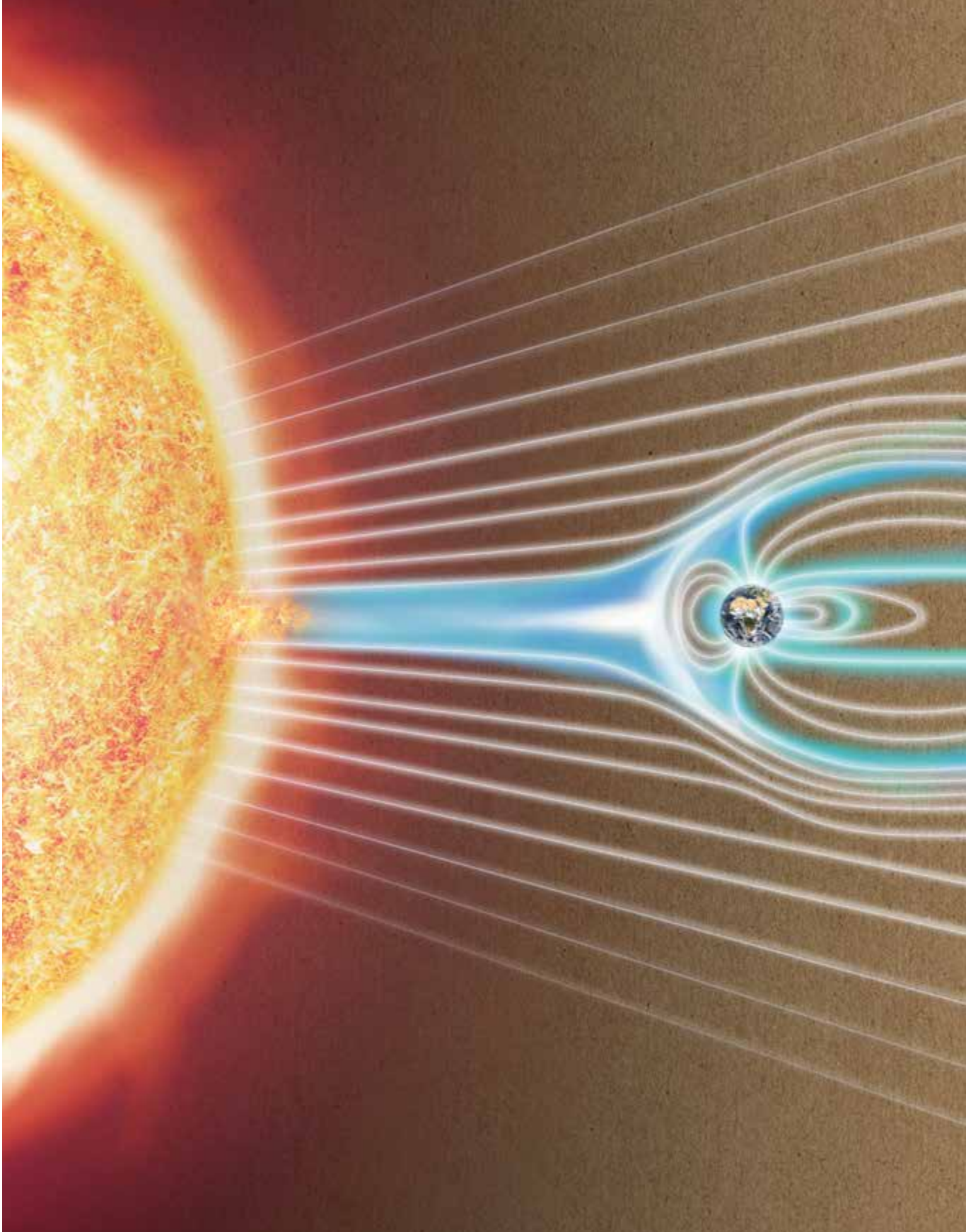
GERARD T'HOOFT
1946–

Physicien hollandais qui a travaillé avec Veltman sur l'énergie nucléaire faible, sur la théorie des champs quantifiés et sur la gravité quantique.

TEXTE EN 30 SECONDES

Leon Clifford

Le comportement mécanique quantique du champ magnétique qui protège la Terre des vents solaires ne pourrait être décrit sans la théorie des champs quantifiés.



QED
QUELQUES PRINCIPES DE BASE

Théorie en 30 secondes

L'électrodynamique quantique (QED) transpose la théorie classique de l'électromagnétisme dans l'univers de la mécanique quantique et de la relativité restreinte. L'électromagnétisme classique explique les courants électriques et les ondes électromagnétiques comme la lumière et les ondes radio du point de vue des champs électromagnétiques, mais la théorie a été développée avant la découverte de l'électron, porteur d'une charge électrique, et du photon, qui transmet la lumière. La mécanique quantique explique comment se comportent les électrons et les photons, mais elle n'arrive pas à traiter correctement les champs électromagnétiques. Elle a aussi des lacunes pour ce qui touche le comportement des électrons en orbite autour de l'atome ; leur vitesse, équivalente à celle de la lumière, requiert qu'on fasse appel à la théorie de la relativité restreinte. Paul Dirac a eu l'idée de l'électrodynamique quantique : il a été le premier à réussir une fusion de la mécanique quantique et de la relativité restreinte dans sa célèbre équation, dite « de Dirac ». Mais l'existence de l'antimatière que prédisait cette équation a soulevé un autre problème. Elle impliquait la possibilité qu'une particule et une antiparticule se pulvérisent mutuellement dans une explosion d'énergie débouchant potentiellement sur de multiples combinaisons de nouvelles particules. Dirac s'est donc rendu compte qu'il devait imaginer une nouvelle théorie capable de gérer ces particules. L'électrodynamique quantique était née.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES
Grâce aux travaux de Paul Dirac, l'électrodynamique quantique a introduit la théorie de l'électromagnétisme dans l'ère quantique.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES
Peu importe l'angle sous lequel on la considère, l'histoire de la physique peut être décrite comme une série de fusions multiples. Maxwell a fusionné l'électricité, le magnétisme et la lumière dans la théorie de l'électromagnétisme ; Einstein a unifié temps et espace dans la théorie de la relativité restreinte ; et la mécanique quantique a fusionné ondes et particules. Dirac a ensuite soudé relativité restreinte et mécanique quantique, et le résultat a été fusionné à l'électromagnétisme pour former l'électrodynamique quantique. Et cette série de fusions successives se poursuit encore de nos jours.

THÉORIES LIÉES
Voir aussi
L'ÉQUATION DE DIRAC
page 60

LA THÉORIE DES CHAMPS QUANTIFIÉS
page 64

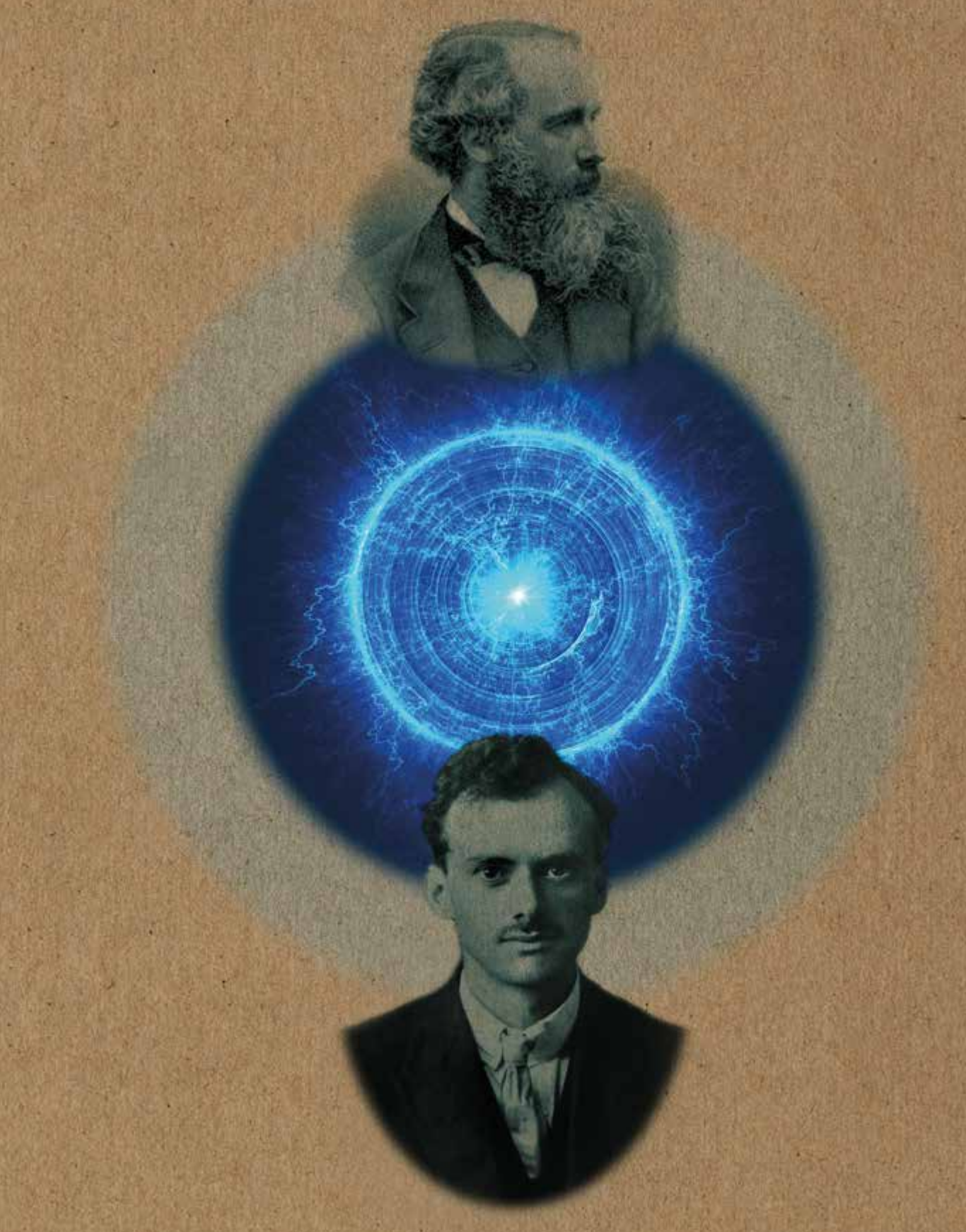
LA CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE
page 148

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES
JAMES CLERK MAXWELL
1831–1879
Scientifique britannique qui a fusionné l'électricité, le magnétisme et la lumière dans une théorie cohérente.

PAUL DIRAC
1902–1984
Physicien britannique dont les recherches ont inspiré l'élaboration de l'électrodynamique quantique.

TEXTE EN 30 SECONDES
Leon Clifford

Dirac a étendu la vision classique de l'électromagnétisme de Maxwell pour qu'elle englobe les particules quantiques.



LES DANGERS DE LA RENORMALISATION

Théorie en 30 secondes

La renormalisation est une technique mathématique pouvant résoudre un problème soulevé par certaines théories des champs quantifiés, comme l'électrodynamique quantique et la chromodynamique quantique. Ce problème inclut l'apparition d'embarrassantes infinités (quantités ou nombres infinis), lesquelles, sans cette technique, rendraient impossible la mise au point de solutions significatives à partir des équations de la théorie. Les infinités peuvent surgir parce que, dans un système quantique, des paires de particules et d'antiparticules surgissent puis disparaissent pour des périodes de temps infinitésimales. Toute tentative de combiner les effets de toutes ces particules différentes mène rapidement à l'infinité, dans ce que les mathématiciens appellent des séries divergentes. En termes plus simples, la renormalisation fonctionne en « empaquetant » quelques-uns des éléments qui divergent à l'infini, puis en les mettant en balance ; les résidus sont remplacés dans l'équation par une constante arbitraire dont la valeur peut être déterminée à l'aide d'une expérience. Une théorie est dite renormalisable si seulement un nombre fini de constantes est requis, et si les valeurs de chacune de ces constantes peuvent être déterminées. Pour qu'une théorie des champs quantifiés soit validée par la communauté des physiciens, il doit avoir été démontré qu'elle est renormalisable. La gravité quantique n'a pas encore passé ce test.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

La renormalisation est un truc mathématique ingénieux qui résout un gros problème, mais qui a été comparé au jeu des gobelets par son plus célèbre inventeur, Richard Feynman.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

La renormalisation fonctionne, c'est indubitable. Mais Richard Feynman ne s'est jamais dit complètement satisfait de la technique qu'il a contribué à mettre au point. Paul Dirac a lui aussi déconseillé cette approche. Il faut se rappeler que Dirac a prédit l'existence de l'antimatière en refusant d'ignorer certaines solutions apparemment étranges à ses propres équations. Alors, ces infinités ne sont-elles que des irritants mathématiques ou nous révéleraient-elles quelque chose de fondamental sur la face cachée de la réalité ?

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA THÉORIE DES CHAMPS QUANTIFIÉS
page 64

L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE (QED)
page 66

LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN
page 70

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

RICHARD FEYNMAN
1918–1988
Physicien américain et codécouvreur de la renormalisation.

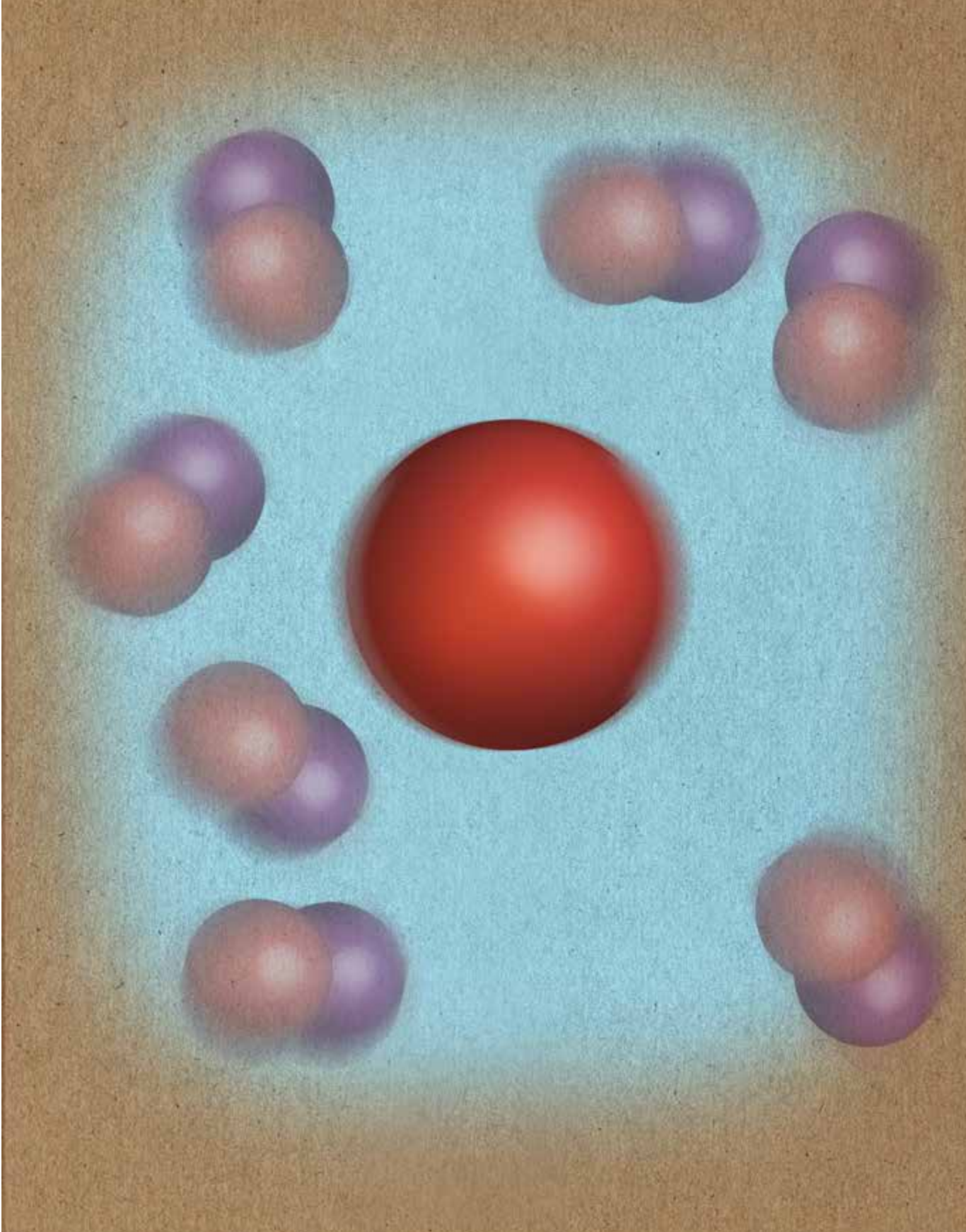
JULIAN SCHWINGER
1918–1994
Physicien américain à qui l'on attribue la renormalisation de l'électrodynamique quantique.

SIN-ITIRO TOMONAGA
1906–1979
Physicien japonais qui a élaboré la renormalisation de façon indépendante.

TEXTE EN 30 SECONDES

Leon Clifford

Les paires particules/antiparticules qui surgissent puis aussitôt disparaissent participent au besoin de renormalisation des infinités.



LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN

Théorie en 30 secondes

Pour visualiser ce qui se passe

quand un changement se produit dans le monde quantique, on dessine un diagramme de Feynman, simple graphique faisant apparaître l'interaction des particules subatomiques. Ces diagrammes sont apparus dans les années 1940. Ils mettent en lumière les processus impliqués dans la théorie des photons et des électrons connue sous le nom d'électrodynamique quantique. Ils demeurent pertinents dans tous les domaines de la théorie des champs quantifiés, et ils se sont avérés très efficaces pour donner aux scientifiques un aperçu de certains des calculs les plus complexes de la physique des particules de haute énergie. Pour garantir cohérence et fonctionnalité, chaque diagramme de Feynman obéit à un ensemble de règles. Tous présentent les particules comme une combinaison de lignes droites et ondulées, les interactions se produisant aux points de rencontre de ces lignes. Ces diagrammes peuvent capter une ou plusieurs interactions : un axe représente l'espace, l'autre représente le temps, et les lignes qui traversent les diagrammes en diagonale représentent les particules qui se déplacent à la fois dans le temps et dans l'espace. Ce qui est intéressant, dans ces diagrammes, c'est que les particules d'antimatière longent l'axe du temps dans la direction contraire de celle empruntée par les particules de matière. Ce qui revient à dire qu'une antiparticule est l'équivalent d'une particule de matière normale qui recule dans le temps.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Les diagrammes de Feyman font mieux voir l'univers de la physique quantique – ils le condensent dans un diagramme clair montrant l'interaction de particules dans le temps et dans l'espace.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Est-ce que notre façon de voir la physique affecte notre façon d'y réfléchir ? Les diagrammes de Feynman inaugurent une sorte de sténographie, simple et claire, où le monde se dévoile comme un amas de particules, ce qui contredit les champs continus décrits dans la théorie des champs quantifiés. La morale de cette histoire : les théories et les méthodes scientifiques sont en fait des modèles prédisant ce que l'on peut observer, et non des descriptions véridiques de la réalité.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA THÉORIE DES CHAMPS QUANTIFIÉS
page 64

L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE (QED)
page 66

LES DANGERS DE LA RENORMALISATION
page 68

LA CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE
page 148

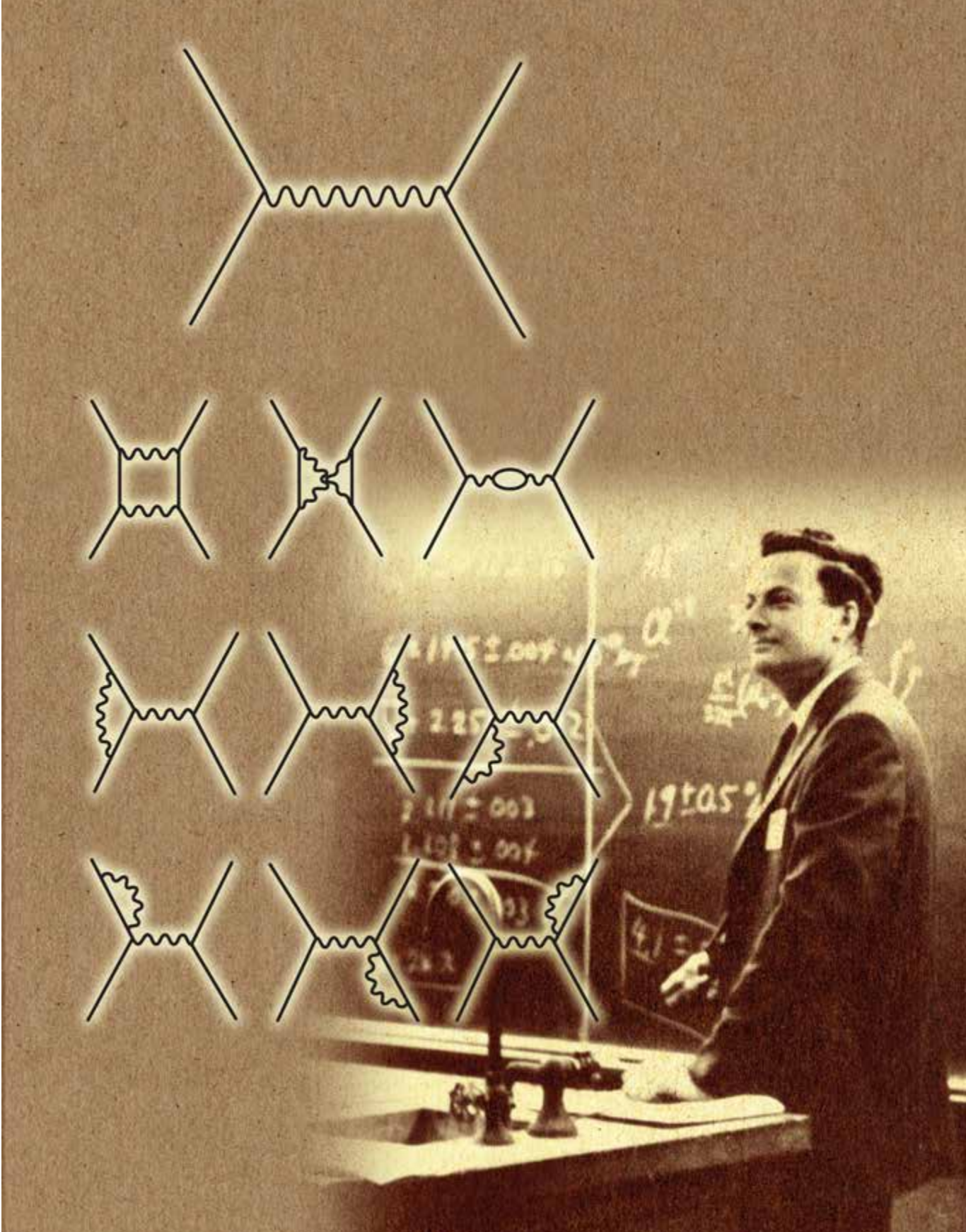
BIOGRAPHIE EN 3 SECONDES

RICHARD FEYNMAN
1918–1988
Physicien américain ayant inventé les diagrammes du même nom.

TEXTE EN 30 SECONDES

Leon Clifford

Les diagrammes de Feynman se sont avérés essentiels pour la compréhension de l'électrodynamique quantique.



RECULER DANS LE TEMPS

Théorie en 30 secondes

C'est James Clerk Maxwell qui, dans ses célèbres équations, a prédit l'existence d'ondes qui reculent dans le temps, et ces prédictions sont devenues partie intégrante de la mécanique quantique. En mathématique, un événement provoquant une onde qui avance dans le temps – disons un électron qui émet un photon sous forme d'onde électromagnétique – crée du même coup un autre type d'onde, qui recule dans le temps. On appelle ces ondes « ondes avancées », puisqu'elles sont en avance sur leur création. Le plus souvent, on ignore les solutions mathématiques bizarres qui les prennent en compte, mais cela ne veut pas dire qu'elles n'existent pas. Bien sûr, une interprétation de la mécanique quantique décrit les événements quantiques sur la base des interactions des ondes, certaines reculant, d'autres avançant dans le temps. Mais personne n'a jamais vu une onde avancée. On émet parfois l'hypothèse que la deuxième loi de la thermodynamique serait en cause et que les deux types d'ondes apparaissent de fait en nombre égal, comme l'ont prédit les mathématiques. La deuxième loi de la thermodynamique implique que l'onde qui avance dans le temps sera absorbée à un moment ou l'autre dans l'avenir et que toutes les preuves de son existence seront inévitablement effacées.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

En mécanique quantique, le temps est une rue à double sens où les ondes se déplacent vers l'avant et vers l'arrière dans le temps, bien que seules les ondes qui avancent dans le temps soient détectables.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Si un jour on arrivait à détecter des ondes avancées, il serait en principe possible de s'en servir pour envoyer un message dans le passé : il suffirait de pointer l'émetteur vers l'endroit précis de l'espace où la Terre se trouvait à un moment donné du passé. Mais quelles en seraient les conséquences ?

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE
page 84

L'INTERPRÉTATION DES MONDES MULTIPLES
page 92

L'EPR
page 98

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

JAMES CLERK MAXWELL
1831–1879
Scientifique britannique qui a combiné l'électricité, le magnétisme et la lumière dans une théorie cohérente.

JOHN ARCHIBALD WHEELER
1911–2008
Physicien américain qui a expliqué, avec Richard Feynman, pourquoi on ne peut pas voir les ondes avancées.

TEXTE EN 30 SECONDES

Leon Clifford

Les ondes avancées, invisibles, reculent dans le temps ; elles recherchent l'origine, le moment précis de leur émission.

EFFETS QUANTIQUES ET INTERPRÉTATION

EFFETS QUANTIQUES ET INTERPRÉTATION
GLOSSAIRE

diffusion de Bohm Rapport mathématique traduisant la vitesse à laquelle un plasma (un groupe d'ions chargés) se diffuse sous l'influence d'un champ magnétique. Ce processus est beaucoup plus complexe que la diffusion d'un gaz, mais on le décrit à l'aide d'une formule simple comprenant uniquement la température, la force du champ magnétique et une constante.

effet tunnel à temps zéro Comme une particule quantique n'a pas de position précise avant d'être observée, elle peut passer à travers un obstacle normalement infranchissable. Ce processus est appelé l'effet tunnel. Quand, au cours d'une expérience, on prend une mesure d'une particule progressant sur une voie momentanément bloquée, les particules qui pénètrent l'obstacle par effet tunnel semblent, au cœur de l'ostacle, échapper au temps, d'où l'expression effet tunnel à temps zéro.

expérience de pensée Une expérience qui n'est pas réalisée concrètement, mais dont on peut se servir pour prouver un concept ou une idée. Le Chat de Schrödinger (voir page 46) est sans doute l'expérience de pensée la plus connue en physique, mais Einstein, par exemple, s'en servait constamment, surtout pour tenter de discréditer la théorie quantique. Sa plus célèbre, l'expérience de pensée EPR (voir page 98), a mené à la multiplication d'expériences bien réelles qui ont fait la preuve de l'intrication quantique.

fonction d'onde En physique quantique, la fonction d'onde est une formule mathématique qui décrit le comportement de l'état quantique d'une particule et qui, suivant l'équation d'onde de Schrödinger, évolue dans le temps. L'onde en question, qui s'étend dans le temps, ne décrit pas la particule elle-même, mais plutôt une probabilité d'état quantique doté d'une valeur particulière. Elle peut donc décrire, par exemple, la probabilité de découvrir une particule à différentes positions. On obtient la probabilité à l'aide du carré de la fonction d'onde.

particules alpha/désintégration alpha Les particules alpha sont des noyaux d'hélium composés de deux protons et de deux neutrons. Avec les particules bêta et le rayonnement gamma, elles sont l'un des trois types de rayonnement produits dans la désintégration radioactive, qui se produit quand le noyau d'un atome perd une partie de sa masse après une émission d'énergie.

photon Particule quantique de lumière et vecteur de la force électromagnétique. Jusqu'au 20e siècle, on a cru que la lumière était une onde, mais les théories et les expériences ont montré qu'on pouvait aussi la traiter comme une particule dénuée de masse.

projet Manhattan Projet des pays alliés, lors de la Deuxième Guerre mondiale, de construire une bombe atomique, les services secrets affirmant que l'Allemagne tentait d'en fabriquer une. Le projet était mené par les États-Unis sur leur propre territoire, mais le Royaume-Uni et le Canada y ont apporté une importante contribution. Baptisé « projet Manhattan » parce que le quartier général provisoire de l'armée était installé sur Broadway, le projet s'est d'abord déployé sur plusieurs sites, puis a centralisé ses opérations à Los Alamos, au Mexique. Le premier essai atomique a eu lieu le 16 juillet 1945 sous le nom de code Trinité sur l'actuelle zone de tests de White Sands. Moins d'un mois plus tard, la bombe était déployée au Japon.

superposition La superposition est un comportement fondamental de la théorie quantique qui n'a aucun équivalent dans l'univers « macro » des objets qui nous entourent. Le principe est que là où une particule quantique a un état qui comporte, par exemple, deux valeurs possibles – comme le « spin », qui peut être « up » ou « down » – elle n'aura pas une valeur réelle, mais seulement une probabilité de se retrouver dans un état ou dans l'autre, tant qu'elle ne sera pas mesurée lors de sa réduction à une valeur unique, réelle. La pièce de monnaie qu'on lance en l'air est un élément du monde réel doté de deux états. Avant que l'on regarde la pièce, son état peut être « pile » ou « face », chacun ayant une probabilité de 50 %, mais on sait bien qu'en fait, elle a déjà une de ces valeurs : l'une des faces est déjà vers le haut. Toutefois, une particule quantique n'a pas de valeur, juste des probabilités, tant qu'elle est en superposition.

LES DIVISEURS DE FAISCEAU

Théorie en 30 secondes

Tout le monde connaît l'ingénieux dispositif quantique appelé diviseur de faisceau, dont le plus glorieux exemple est… le verre de votre fenêtre. Vous êtes dans une pièce, la nuit. La lumière est allumée et vous regardez dehors. Vous apercevez très nettement votre reflet. Mais si vous allez dehors, vous pouvez aussi voir à l'intérieur de la pièce. Une partie infime de la lumière – peut-être 5 % – est reflétée à l'intérieur de la pièce, mais le plus gros de la lumière traverse la fenêtre (c'est la nuit qu'on s'en rend compte, les reflets étant quasi invisibles le jour). Ce problème est intéressant. Newton croyait que la lumière était formée de particules, mais il ne pouvait expliquer pourquoi une particule donnée se reflétait ou passait à travers la fenêtre. Il a pensé que cela pouvait être causé par des imperfections de surface, mais aucune expérience n'a soutenu cette théorie. Aujourd'hui, on sait que le phénomène est dû à la nature quantique des photons. On ne peut pas savoir si un photon va se refléter ; on ne peut qu'en prédire la probabilité. L'effet est d'autant plus remarquable que le pourcentage de photons reflétés depuis la surface intérieure dépend de l'épaisseur du verre. Les photons qui entrent sont influencés par l'épaisseur car, en tant que particules quantiques, ils sont suffisamment répartis pour pouvoir interagir avec toute la plaque, pas seulement avec sa surface.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Une fenêtre est un dispositif quantique appelé diviseur de faisceau qui permet à un certain pourcentage de photons de passer au travers.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Les diviseurs de faisceau sont capables d'intriquer des particules. Le processus s'enclenche avec un photon envoyé, sans qu'on l'observe, à travers un diviseur de faisceau. Ce photon est dans une superposition d'états, puisqu'on ne connaît que les probabilités qu'il se soit reflété ou qu'il soit passé de l'autre côté. Chaque chemin emprunté interagit avec un nuage d'atomes, puis traverse un diviseur de faisceau polarisant, choisissant une direction au moment de la polarisation. À la fin, le photon est détecté, déclenchant l'intrication des nuages d'atomes.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA DOUBLE FENTE QUANTIQUE
page 32

L'EFFET TUNNEL
page 80

L'EPR
page 98

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

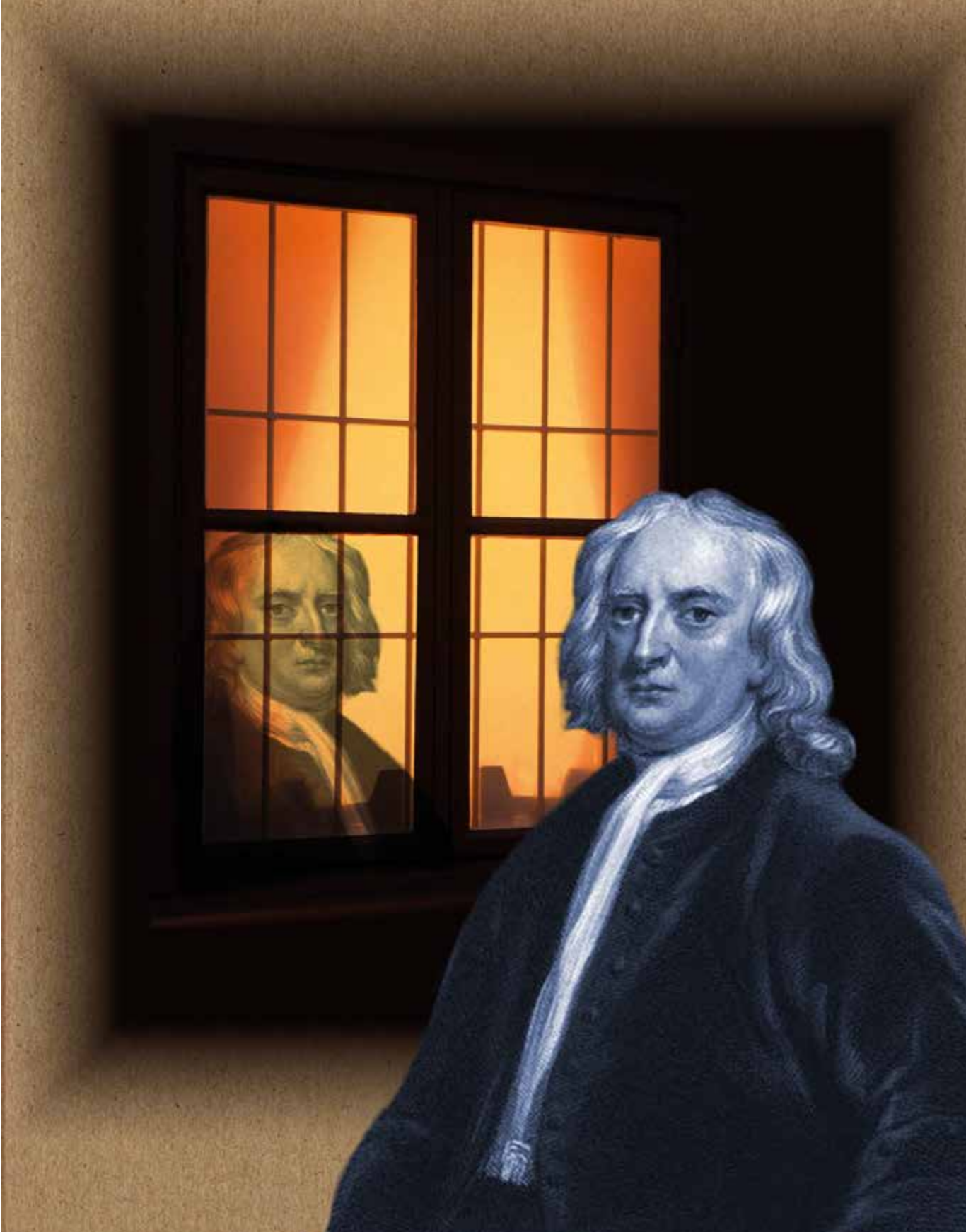
ISAAC NEWTON
1642–1727
Physicien britannique rendu célèbre par ses découvertes sur la pesanteur et les lois du mouvement, mais aussi très impliqué dans des travaux d'optique.

MICHAEL HORNE
1943–
Éminent physicien américain, expert en théorie quantique et en intrication et spécialiste des diviseurs de faisceau.

TEXTE EN 30 SECONDES

Brian Clegg

La plus grande partie de la lumière passe à travers la vitre, mais une fraction est reflétée. Newton a tout fait pour expliquer ce processus.



L'EFFET TUNNEL

Théorie en 30 secondes

Si une boule lancée vers le haut d'une pente n'a pas la force suffisante pour arriver au sommet, elle ne se rendra jamais de l'autre côté. Cela paraît évident, mais en physique quantique, ce n'est jamais vrai. Un objet quantique tel qu'un photon ou un électron peut traverser un obstacle même si, en termes classiques, il n'a pas la force pour le faire.
Ce phénomène, que l'on appelle l'effet tunnel, découle du fait que les particules quantiques n'ont pas de position bien définie, seulement une fonction d'onde décrivant la probabilité de trouver l'objet à différents endroits dans l'espace. La présence d'un obstacle atténue la fonction d'onde mais ne la réduit pas à zéro, pas même de l'autre côté de l'obstacle ; il y a une chance, même petite, que l'objet soit découvert à cet endroit. L'effet tunnel joue un rôle important dans plusieurs phénomènes naturels. C'est ce qui permet aux particules alpha d'échapper aux puissantes forces d'agglomération du noyau atomique en voie de désintégration radioactive ; il peut accélérer la vitesse de certains processus chimiques et rend possibles certaines réactions chimiques dans le grand froid de l'espace interstellaire. La technologie s'en est emparée, entre autres pour ces diodes où des électrons arrivent à pénétrer la jonction entre deux types de semi-conducteurs.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES
L'effet tunnel est une pénétration de particules quantiques à travers un obstacle, même si, d'un point de vue classique, ces particules n'ont pas l'énergie suffisante pour le faire.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES
L'effet tunnel peut s'avérer utile dans la microélectronique des semi-conducteurs, mais il peut aussi engendrer certains problèmes. Comme les transistors des puces en silicium se miniaturisent, les couches isolantes entre les composants s'amincissent jusqu'à mesurer à peine quelques atomes de diamètre, ce qui les rend sujettes aux fuites, puisque les électrons peuvent alors les pénétrer par effet tunnel. Il devient alors impossible d'éteindre les dispositifs. On est parvenu à régler le problème en remplaçant l'isolant de dioxyde de silicium par un dioxyde de hafnium.

THÉORIE LIÉE
Voir aussi
LES JONCTIONS DE JOSEPHSON
page 126

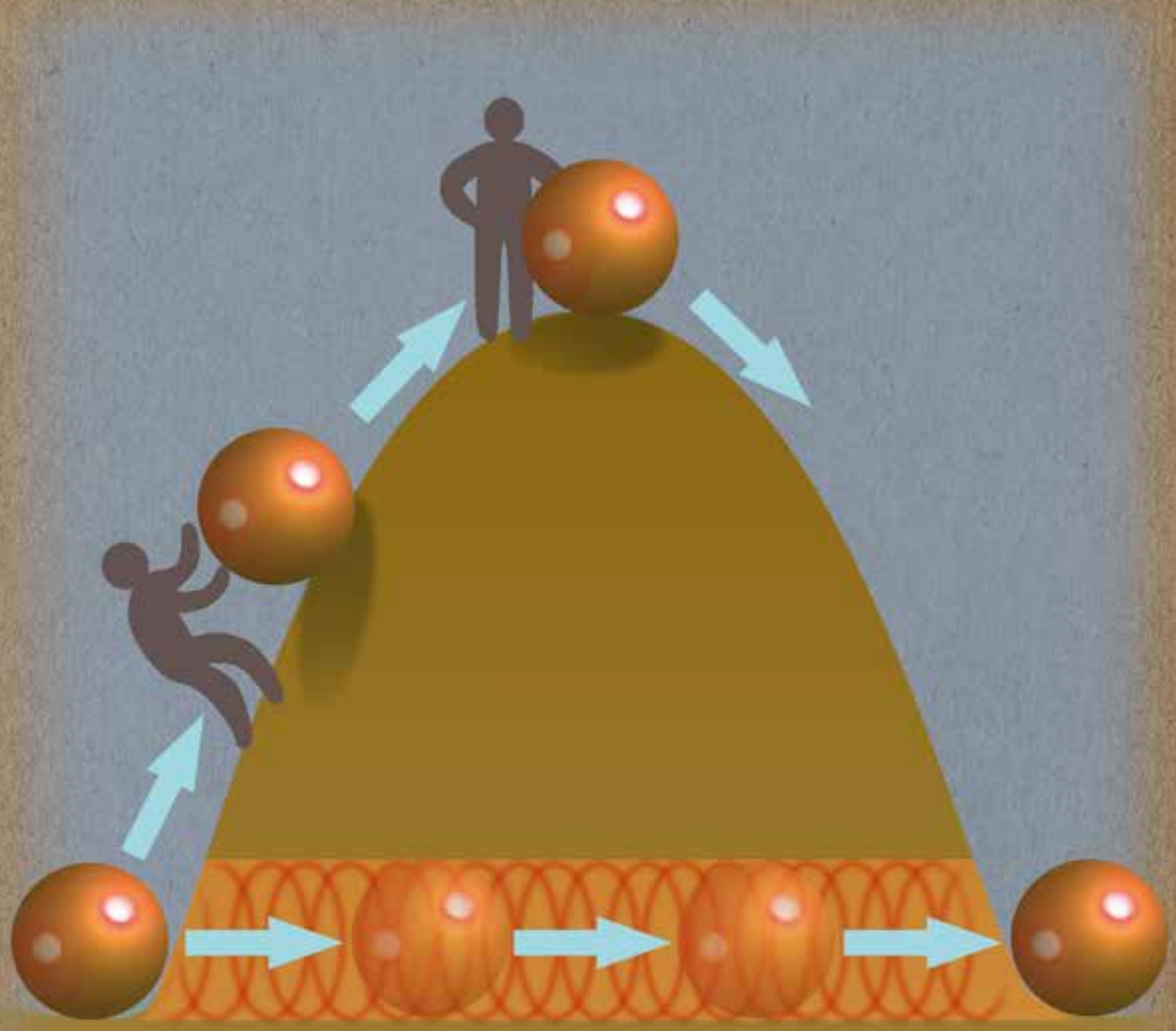
BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES
FRIEDRICH HUND
1896–1997
Physicien allemand pionnier de la chimie quantique qui fut le premier à reconnaître l'importance de l'effet tunnel dans les spectres lumineux des molécules.

GEORGE GAMOW
1904–1968
Physicien théoricien américain né en Russie qui a reconnu l'importance de l'effet tunnel dans la désintégration alpha.

GERD BINNIG et HEINRICH ROHRER
1947– et 1933–2013
Inventeurs allemand et suisse du microscope à effet tunnel dans les années 1980, pour lequel ils ont reçu le prix Nobel de physique en 1986.

TEXTE EN 30 SECONDES
Philip Ball

Une particule qui pénètre par effet tunnel contourne un obstacle en se déplaçant du point A au point B sans traverser l'espace qui les sépare.



LES EXPÉRIENCES SUPRALUMINIQUES

Théorie en 30 secondes

L'une des plus saisissantes

trouvailles de la physique quantique est que les photons peuvent voyager à des vitesses supérieures à celle de la lumière. De telles expériences « supraluminiques » envoient des photons vers un obstacle à travers lequel ils ne devraient normalement pas passer. La théorie quantique nous dit que la position d'un photon n'est pas fixe, et qu'il y a une petite probabilité qu'il sera déjà de l'autre côté de l'obstacle. Une poignée de photons passent donc instantanément au travers et continuent leur route. Si la largeur de l'obstacle est de 1 unité de distance et que le photon parcourt la même distance d'un côté ou de l'autre de l'obstacle, il traverse 3 unités de distance dans le temps qu'il faut à la lumière pour en couvrir 2 ; il se déplace alors à 1,5 fois la vitesse de la lumière. Un des pionniers de cette expérience, Raymond Chiao, soutient qu'il est impossible d'envoyer un message de cette façon, car les photons qui franchissent un obstacle sont aléatoires. Mais en 1995, Günther Nimtz a modulé le faisceau pénétrant et l'a prouvé en faisant jouer un enregistrement de la symphonie n° 40 de Mozart à quatre fois la vitesse de la lumière. On débat toujours la question de savoir si le signal va réellement plus vite que la vitesse de la lumière ou s'il est déformé par le processus lui-même, un peu comme le coureur qui se penche vers l'avant pour arriver le premier.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Comme les particules quantiques qui percent un obstacle le font instantanément, les photons soumis à l'effet tunnel semblent aller plus vite que la lumière.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Les premières expériences réalisées ont utilisé des obstacles très sophistiqués, appelés microguides d'ondes, ou treillis photoniques. Nimtz utilise l'exemple d'un effet tunnel découvert par Newton : la réflexion totale interne manquée. Quand un rayon de lumière entre dans un prisme sous un angle droit, il rebondit sur l'arrière du verre. Newton a découvert qu'en plaçant un deuxième prisme à proximité du premier, on permet à une partie du rayon de passer au travers au lieu de rebondir : les photons pénètrent par effet tunnel l'obstacle formé par l'espace entre les prismes.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER
page 42

L'EFFET TUNNEL
page 80

LES JONCTIONS DE JOSEPHSON
page 126

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

ISAAC NEWTON
1642–1727
Physicien britannique célèbre pour sa découverte des lois de la pesanteur et du mouvement, mais aussi très actif en optique.

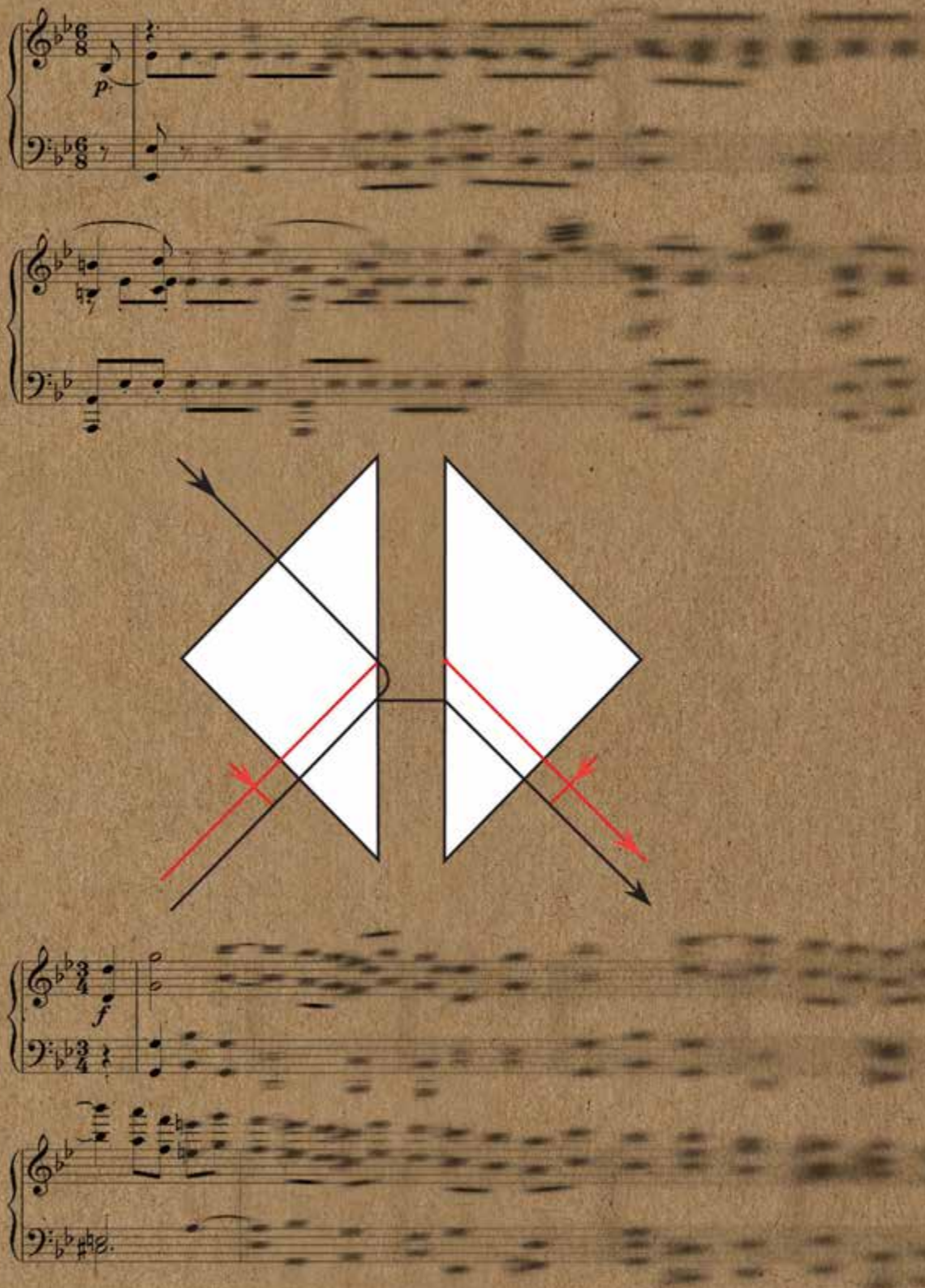
GÜNTER NIMTZ
1936–
Physicien allemand qui a travaillé sur l'impact du rayonnement électromagnétique sur les humains, et sur les conséquences supraluminiques de l'effet tunnel.

RAYMOND CHIAO
1940–
Physicien américain spécialisé en optique quantique.

TEXTE EN 30 SECONDES

Brian Clegg

Nimtz a utilisé l'effet tunnel pour lancer une symphonie de Mozart à une vitesse supérieure à celle de la lumière.


p
f

L'INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE

Théorie en 30 secondes

À mesure qu'elle prenait forme dans les années 1920, la théorie quantique devenait de plus en plus étrange. L'équation de Schrödinger impliquait que les particules pouvaient se comporter comme des ondes. Les particules quantiques pouvaient se superposer. Heisenberg y est allé de son principe d'indétermination. Mais qu'est-ce que tout cela signifiait ? Niels Bohr, installé à Copenhague et assisté de Heisenberg, a mis de l'avant une analyse déconcertante, en ce qu'elle rompait avec tous les préjugés en cours. Cette interprétation partait du fait qu'en théorie quantique, il demeure toujours des questions sans réponse, et qu'une expérience donnée peut en contredire une autre. Tout ce que l'on connaît du monde tient aux mesures que l'on peut en faire. Prenons par exemple l'expérience classique du rayon de photons projeté vers deux fentes parallèles. Si l'on ne cherche pas à savoir à travers quelle fente les photons vont passer, ils se comportent comme des ondes, faisant se former, de l'autre côté, un schéma d'interférence constitué de zones claires et de zones sombres. Si l'on installe l'appareillage voulu pour détecter quelle fente ils vont traverser, le schéma d'interférence disparaît. Mais quelle fente ont-ils effectivement traversée pour provoquer l'interférence ? Selon l'interprétation de Copenhague, on ne peut pas poser cette question. Au-delà de la description quantique, il n'y aurait aucune réalité essentielle, rien de plus fondamental que des probabilités et des mesures.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

L'interprétation de Copenhague affirme qu'il est insensé de chercher plus fondamental, pour des systèmes quantiques, que ce que l'on est capable de mesurer.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

L'élément central de l'interprétation de Copenhague est le principe de complémentarité de Bohr (on peut répondre à certaines questions avec une expérience, et à d'autres avec d'autres expériences, mais les résultats ne seront pas nécessairement cohérents). Ici on aperçoit une particule, là une onde. L'une n'est pas plus vraie que l'autre, mais on a besoin des deux. Beaucoup de physiciens sont d'accord avec cette idée mais ils trouvent Bohr et ses collègues moins convaincants avec leur désir d'étendre le principe de complémentarité à d'autres domaines.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA DOUBLE FENTE QUANTIQUE
page 32

LA DUALITÉ ONDE/PARTICULE
page 28

L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER
page 42

LE PRINCIPE D'INDÉTERMINATION D'HEISENBERG
page 48

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

DAVID MERMIN

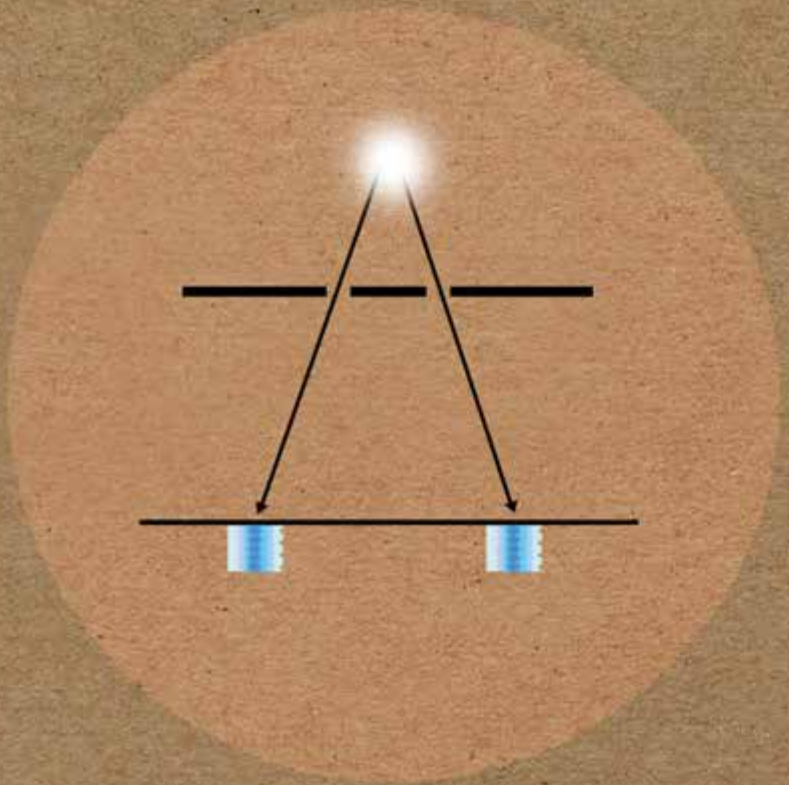
1935–

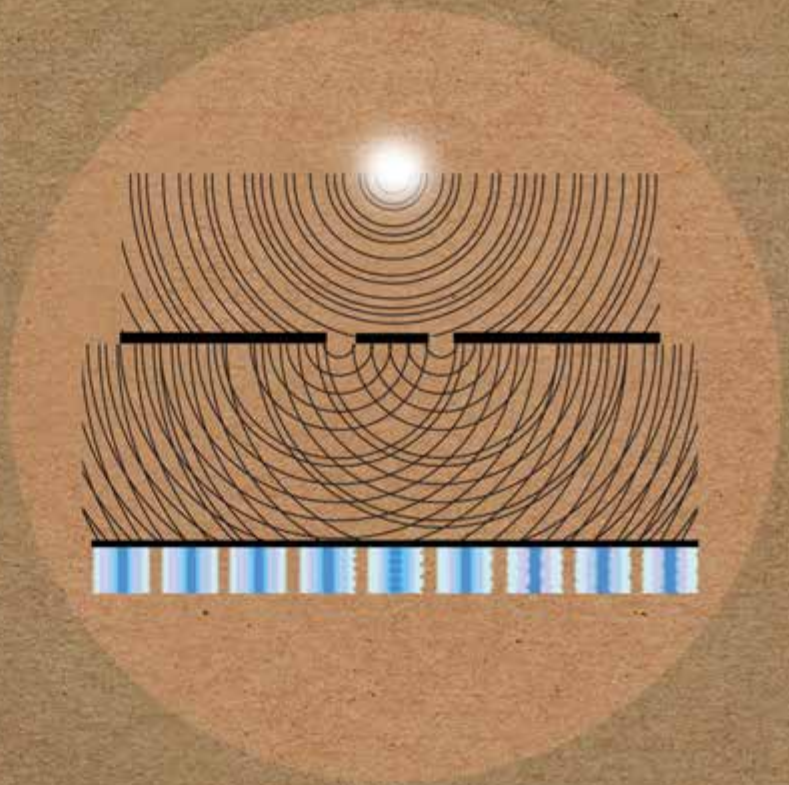
Physicien américain devenu célèbre pour sa version de l'interprétation de Copenhague : « Taisez-vous et calculez ! »

TEXTE EN 30 SECONDES

Philip Ball

Selon le principe de complémentarité, la lumière peut agir en tant qu'onde (image du haut) ou en tant que particule (image du bas), mais elle ne peut faire les deux en même temps.





L'INTERPRÉTATION DE BOHM

Théorie en 30 secondes

L'interprétation de Copenhague

n'est pas la seule à décrire ce qui se passe quand on essaie de mesurer un système quantique, soit la réduction de la fonction d'onde. L'autre interprétation affirme que les soi-disant problèmes de mesure en physique quantique n'existent pas, puisque les particules ne sont jamais, et en aucun moment, à un seul endroit, même si personne n'est là pour les observer. Ainsi, dans l'expérience de la double fente, les particules ne traversent pas les deux fentes simultanément : chaque particule ne traverse qu'une fente. En vertu de ce modèle, la fonction d'onde sert à déterminer la distribution des particules à la fin de l'expérience, et l'apparente réduction localisée de la fonction d'onde résulte simplement d'une mesure donnée, prise à un moment précis sur des particules discrètes déjà engagées sur des chemins clairement définis. Une telle approche causale et déterministe de la mécanique quantique contraste nettement avec le traitement probabiliste, plus classique. Cette approche radicalement différente s'appelle l'interprétation de Bohm, nom donné par David Bohm, physicien théoricien américain. Louis de Broglie a développé des idées similaires quand la mécanique quantique faisait ses premiers pas, et l'on parle parfois de la théorie Broglie-Bohm.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Bohm a tenté d'éliminer de la mécanique quantique le facteur du hasard, défiant du coup la théorie la plus largement acceptée.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

S'il s'avère que la réalité s'appuie en fait sur un schéma déterministe, si chaque élément de notre monde, incluant nos petites cellules grises, obéit aux lois de la physique gouvernant l'univers, peut-on réellement parler de libre arbitre ?

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE
page 84

L'INTERPRÉTATION DES MONDES MULTIPLES
page 92

L'EPR
page 98

L'INÉGALITÉ DE BELL
page 100

BIOGRAPHIE EN 3 SECONDES

LOUIS DE BROGLIE
1892–1987

Physicien français qui fut l'un des premiers à adopter une approche causale de la mécanique quantique.

TEXTE EN 30 SECONDES

Leon Clifford

L'interprétation de Bohm marquerait le retour de l'univers mécanique, où toute chose est prédéterminée.

20 décembre 1917
Naît à Wilkes-Barre en Pennsylvanie, aux États-Unis

1939
Awarded BSc from Diplômé de l'Université publique de Pennsylvanie.

1940
Rejoint Robert Oppenheimer à l'Université de Californie, à Berkeley.

1943
Obtient un doctorat sur la dispersion nucléaire et travaille au Laboratoire national Lawrence-Berkeley, en étroite collaboration avec les responsables du projet Manhattan.

1947
Devient professeur adjoint de physique à Princeton, où il travaille avec Albert Einstein et mène des recherches sur le plasma, les métaux et la mécanique quantique.

1949
Découvre une loi de la diffusion des plasmas dans les champs magnétiques – aujourd'hui appelée « diffusion de Bohm » – et publie un document décrivant le phénomène.

1951
S'établit au Brésil, où il publie son premier ouvrage, *Théorie quantique*. Son approche est plutôt classique.

1957
S'installe au Royaume-Uni, où il publie sa vision déterministe de la mécanique quantique dans *Causality and Chance in Modern Physics*.

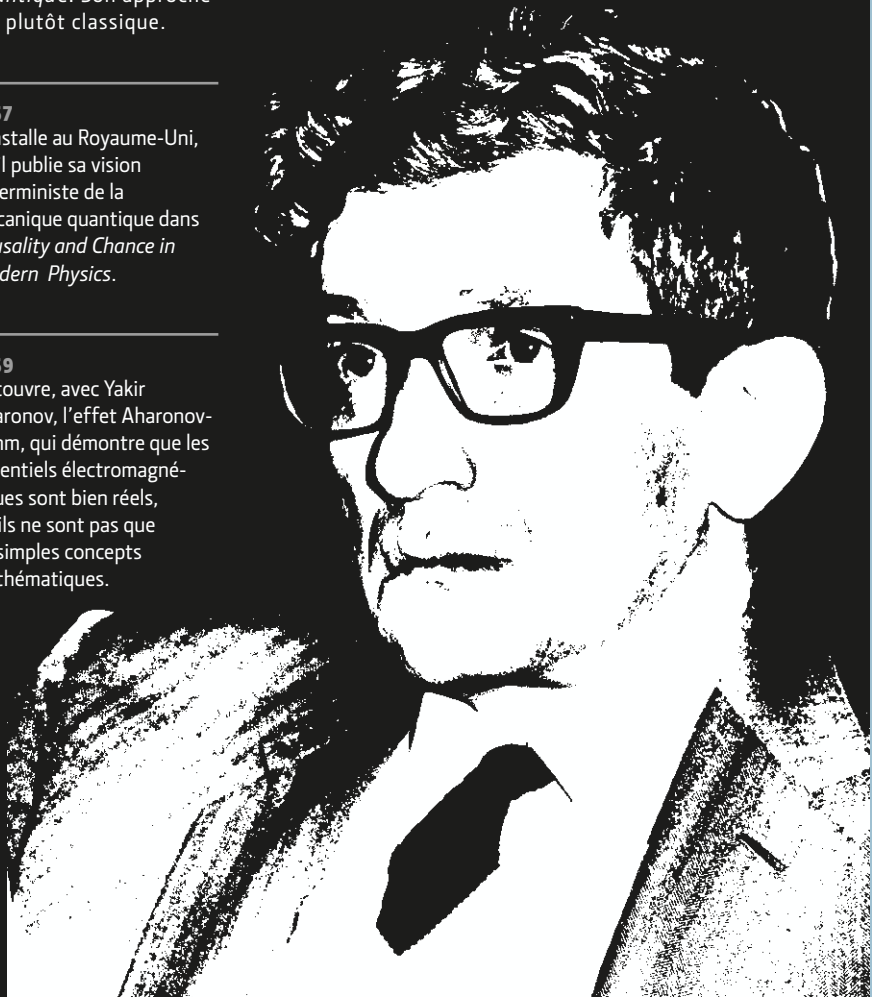
1959
Découvre, avec Yakir Aharonov, l'effet Aharonov-Bohm, qui démontre que les potentiels électromagnétiques sont bien réels, qu'ils ne sont pas que de simples concepts mathématiques.

1980
Publie *La plénitude de l'univers* ; il y expose sa conviction d'un fondement sous-jacent à la réalité.

1990
Est élu Membre de la Société Royale.

27 octobre 1992
Décède à Londres.

1993
Publication posthume de *The Undivided Universe : An ontological Interpretation of Quantum Theory*, écrit en collaboration avec Basil Hiley, un texte majeur exposant l'interprétation de Bohm.



DAVID BOHM

Toute la carrière de David Bohm, physicien théoricien, a été hantée par la recherche d'un ordre fondamental sous-jacent à l'univers. Cette quête a jeté le doute dans les esprits, et notamment sur la validité de l'interprétation de Copenhague. Elle a inspiré ses travaux en mécanique quantique, elle est la cause de son flirt avec le mysticisme oriental pendant les dernières années de sa vie, et c'est aussi elle qui l'a mené, dans les années 1930, à une affiliation au communisme qui l'a forcé à quitter son pays natal, les États-Unis, et à vivre *de facto* en exil.

En 1949, il a refusé de témoigner devant le Congrès contre son ancien directeur de thèse, Robert Oppenheimer, que l'on suspectait d'être sympathisant communiste. Bohm a été arrêté et accusé d'outrage à magistrat. Il a été jugé puis acquitté, mais le scandale lui a coûté son poste à Princeton. Il est alors parti travailler au Brésil, en 1951, puis en Israël, en 1955. Il s'est finalement installé au Royaume-Uni en 1957, où il est devenu professeur au Birkbeck College de l'Université de Londres. Il a alors eu tout le loisir de développer son interprétation de la théorie quantique.

Deux grandes amitiés ont marqué son parcours intellectuel : le physicien Albert Einstein à Princeton, et le philosophe Jiddu Krishnamurti à Londres. Chacun à sa façon, les deux hommes ont accompagné sa quête d'un ordre, en science et dans la société. Les doutes permanents d'Einstein concernant la mécanique quantique et sa conviction selon laquelle « Dieu ne joue pas aux dés » ont incontestablement marqué le jeune Bohm. L'approche spirituelle de Krishnamurti a quant à elle renforcé, d'un point de vue philosophique, son idée de l'unicité de l'univers.

Bohm était convaincu qu'une réalité plus profonde sous-tend l'univers et que le monde que l'on voit autour de nous n'est qu'illusion, une sorte de fantôme ou de projection de cette cohérence cachée. Selon lui, la vraie réalité ne peut être captée que par un esprit libre, débarrassé des leurres engendrés par le processus même de la pensée. Son interprétation était que l'univers visible – l'espace, le temps, les particules et la mécanique quantique – n'est que le déploiement naturel de cette réalité profonde sous-jacente, qu'il appelait l'ordre implicite.

Ces convictions l'ont conduit à une réinterprétation de la mécanique quantique qui plaçait la fonction d'onde au cœur de l'univers, fonction pouvant évoluer en vertu de l'équation de Schrödinger, déterministe, guidant chaque particule vers une existence donnée. Cette approche causale et déterministe contraste avec l'explication probabiliste de l'interprétation de Copenhague. L'interprétation peu orthodoxe que Bohm suggérait de la mécanique quantique n'a jamais rallié la communauté scientifique, mais elle ne demeure pas moins une interprétation cohérente.

LA RÉDUCTION PAR LA CONSCIENCE

Théorie en 30 secondes

Les fonctions d'onde quantiques se réduisent quand on essaie d'observer et de mesurer des systèmes quantiques. Quand cela se produit, tous les états potentiels du système quantique se réduisent à l'unique état en observation, phénomène qui a donné naissance aux interprétations de Copenhague, des mondes multiples et de Bohm. Mais le débat persiste sur la cause et sur le moment exact de la réduction au cours de la mesure. Une des hypothèses (peu retenue de nos jours) voulait que la fonction d'onde se réduise seulement quand un observateur conscient est impliqué dans la mesure. Les observateurs conscients ne peuvent voir le monde que d'une façon ; ils doivent donc être soit dans un état, soit dans un autre, et ils ne peuvent être simultanément dans plusieurs états. C'est cette exigence de la conscience de n'être que dans un seul état qui force la fonction d'onde à se réduire. Pour expliquer cette idée, le physicien Eugene Wigner a proposé une autre version de l'expérience du chat de Schrödinger : il a imaginé qu'un ami soit placé dans la même boîte que le chat. Selon Wigner, la présence de l'esprit conscient de cet ami causerait la réduction de la fonction d'onde à l'intérieur de la boîte, cristallisant l'état du chat comme vivant ou mort.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Il semble que l'on puisse influencer le monde quantique simplement en le regardant. Mais doit-on pour cela être conscient ?

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

La possibilité que notre esprit interagisse d'une certaine façon avec le monde quantique soulève une question : se pourrait-il que notre conscience soit elle-même un phénomène quantique ? Après tout, notre cerveau est composé d'atomes et fonctionne avec des signaux électriques, qui sont tous soumis aux lois de la physique. La mécanique quantique pourrait-elle un jour fournir une explication au mystère de la conscience humaine ?

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LE CHAT DE SCHRÖDINGER
page 46

LA RÉDUCTION DE LA FONCTION D'ONDE
page 50

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

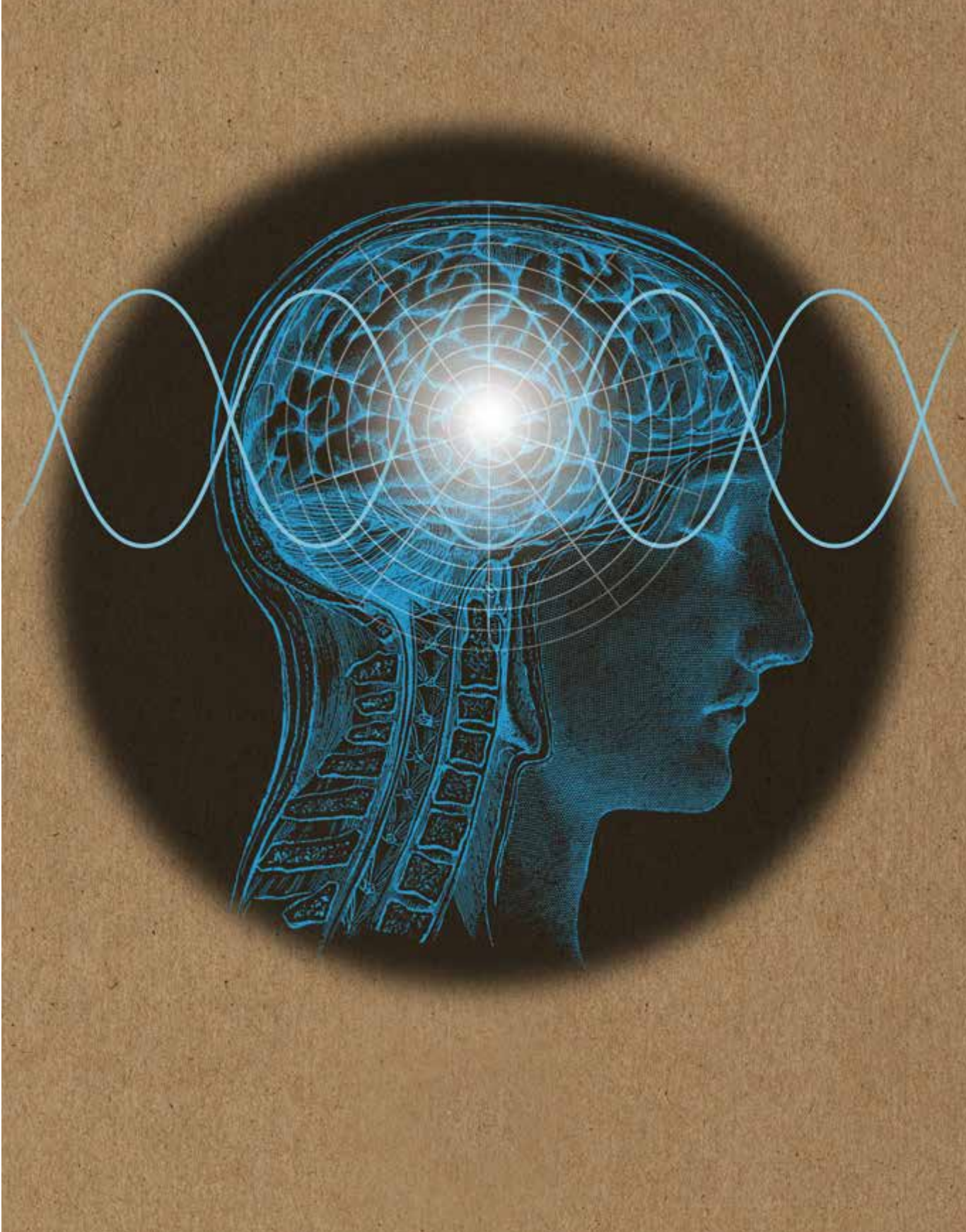
EUGENE WIGNER
1902–1995
Physicien hongrois qui fut le premier à lancer l'idée que la réduction de la fonction d'onde résulte d'une interaction avec notre conscience.

JOHN VON NEUMANN
1903–1957
Mathématicien hongrois qui voyait la conscience comme chaînon de la réduction de la fonction d'onde quantique.

TEXTE EN 30 SECONDES

Leon Clifford

Certains physiciens ont émis l'hypothèse que l'on a besoin d'un observateur conscient pour provoquer la réduction d'une fonction d'onde.



L'INTERPRÉTATION DES MONDES MUTIPLES

Théorie en 30 secondes

Plusieurs physiciens soutiennent l'interprétation de Copenhague de la physique quantique, qui affirme que les particules quantiques peuvent vraiment se trouver dans plus d'un état quantique à la fois, et que l'onde de probabilité prédisant leur position les rend capables d'agir comme si elles étaient dans plusieurs endroits. Pour certains, cependant, c'est un pas de trop. Hugh Everett voulait absolument trouver une façon de rationaliser le comportement erratique des particules. Dans sa thèse de doctorat, très controversée, il a élaboré une théorie qui allait être au cœur de ses travaux : l'interprétation des mondes multiples. Cette interprétation se passe de l'idée de réduction d'ondes fournissant une valeur précise en observation. L'interprétation des mondes multiples affirme plutôt que chaque fois qu'une particule quantique est dotée de plus d'un état, le monde se ramifie. La particule existe dans un état selon une version de l'univers, et dans un autre selon la seconde version. Notre réalité n'est qu'un chemin traversant chacun de ces mondes. On n'a plus à s'inquiéter de la manière dont un photon ou un électron interfère avec lui-même quand il est soumis à l'expérience de la traversée d'une double fente : dans un univers, il passe par la première fente ; dans un autre, il passe par la seconde. Bien que nous ne vivions qu'un seul monde à la fois, nous pouvons voir le résultat de l'interaction de différents univers dans le schéma d'interférence de zones claires et obscures produites par les doubles fentes.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES
La théorie de 1957, connue sous le nom d'interprétation des mondes multiples, avance l'hypothèse de l'existence d'une multiplicité d'univers parallèles.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES
Si l'interprétation des mondes multiples est vraie, alors le plus célèbre paradoxe de la théorie quantique, celui du chat de Schrödinger, n'est plus un problème. Dans un monde, le chat est vivant ; dans l'autre, il est mort. Il ne peut être simultanément les deux dans un même monde. Cependant, plusieurs physiciens disent que la complexité extrême de cette théorie, qui suppose l'existence d'un nouveau monde chaque fois qu'une particule donnée de l'univers subit un changement, est trop cher payer pour contourner l'étrangeté de l'interprétation de Copenhague.

THÉORIES LIÉES
Voir aussi
LE CHAT DE SCHRÖDINGER
page 46

L'INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE
page 84

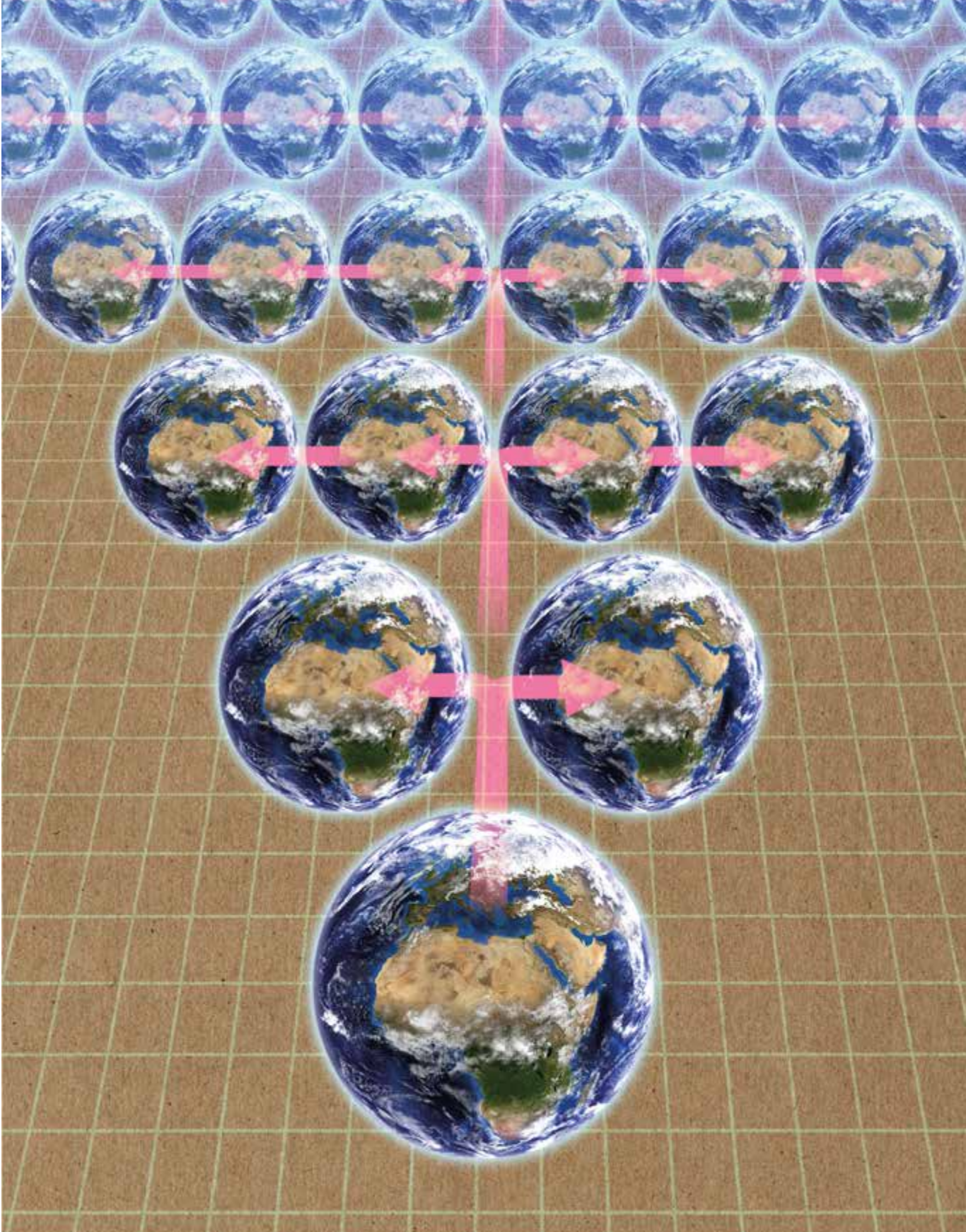
L'INTERPRÉTATION DE BOHM
page 86

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES
HUGH EVERETT III
1930–1982
Physicien américain qui fut le premier à proposer cette interprétation.

BRYCE DEWITT
1923–2004
Physicien américain qui a vulgarisé et nommé l'interprétation des mondes multiples.

TEXTE EN 30 SECONDES
Brian Clegg

Dans l'interprétation des mondes multiples, un monde différent est créé chaque fois qu'il existe plus d'un effet potentiel sur le plan quantique.



INTRICATION QUANTIQUE

appareil d'imagerie par résonance magnétique (IRM) Appareil médical, anciennement appelé appareil de résonance magnétique nucléaire (RMN), utilisant de puissants aimants (souvent supraconducteurs) qui modifient le spin quantique des protons du noyau d'hydrogène des particules d'eau, le plus souvent chez le vivant. Quand les molécules s'agitent, elles agissent comme de petits émetteurs, dont l'émission est aussitôt détectée.

bit Contraction de *BInary digiT* (chiffre binaire). Le bit est l'unité de base du stockage en calcul. Sa valeur est de 0 ou 1.

bit quantique (qubit) Équivalent d'un bit en calcul quantique. Alors que le bit peut n'avoir pour valeur que 0 ou 1, un qubit peut être dans une superposition d'états où il représente les probabilités de valoir 0 ou 1. Les qubits peuvent aussi être intriqués, ce qui multiplie les combinaisons de valeurs, ce qui fait en sorte que l'on peut réaliser des calculs beaucoup plus ambitieux avec des qubits qu'avec un nombre correspondant de bits.

carnet de clés à usage unique Technique de chiffrement indéchiffrable inventée en 1918. Chaque caractère du message à chiffrer se voit associer une valeur choisie au hasard. Le message final est lui-même aléatoire, et n'est susceptible d'aucune intrusion. Bien qu'infaillible, cette technique est demeurée sous-utilisée, car la liste des valeurs (le « carnet ») est nécessaire aux deux extrémités de la communication, et cette liste peut être interceptée.

cavité micro-ondes Chambre métallique maintenant une onde électromagnétique dans la partie micro-onde du spectre. La chambre agit comme un résonateur, un peu comme une corde qui vibre à une fréquence donnée. Mais avec une cavité micro-ondes, plutôt qu'une onde physique entre deux points fixes sur une corde, on obtient une onde électromagnétique entre deux points fixes créés par les parois métalliques de la chambre.

chiffrement Utilisation de codes et de chiffres pour cacher la signification de l'information.

conservation de l'impulsion L'impulsion d'un objet est sa masse multipliée par sa vitesse. L'impulsion ne se dégrade pas : si, par exemple, une particule stationnaire (impulsion nulle) se scinde en deux particules en mouvement, ces particules auront une impulsion égale et opposée.

intrication quantique Dimension fondamentale de la théorie quantique selon laquelle deux particules quantiques (ou plus) peuvent être rattachées d'une manière telle qu'une modification apportée à l'état d'une particule se reflète instantanément sur l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare. Einstein disait ce phénomène impossible, puisque les particules « communiquent » plus vite que la vitesse de la lumière, mais il a été prouvé de façon répétée en laboratoire.

point quantique Nanoparticule d'un semi-conducteur agissant comme atome artificiel. Les points quantiques sont utilisés en technologie quantique, notamment en électronique et dans les cellules solaires, et comme bits cantiques dans les ordinateurs quantiques.

réalité locale Concept voulant qu'une particule quantique ne peut influencer une autre particule que si elle est située tout près (localité) et que ses propriétés ont des valeurs réelles (réalité). L'expérience de pensée EPR d'Einstein (page 98) a établi que soit la théorie quantique est défectueuse, soit la réalité locale n'existe pas pour les particules quantiques.

superposition Quand une particule est dotée d'un état pour lequel il existe, par exemple, deux valeurs possibles, cette particule n'a pas une valeur réelle, mais plutôt une superposition d'états – un ensemble de probabilités d'être dans ces états – jusqu'à ce qu'elle soit mesurée lors de sa réduction à une valeur réelle. Une pièce de monnaie lancée dans les airs a deux états possibles, mais il n'y a pas de superposition : la pièce a l'une de ces valeurs avant même qu'on la regarde. Une particule quantique, toutefois, n'a pas de valeur, seulement des probabilités, tant qu'elle demeure en superposition.

variable cachée Certains scientifiques, dont Einstein, doutaient de la validité d'une théorie quantique basée sur les probabilités. Plutôt qu'en la nécessité d'une probabilité, ils croyaient à une réalité sous-jacente qui produisait la valeur donnée observée. Les valeurs dissimulées sont appelées variables cachées.

L'EPR

Théorie en 30 secondes

En 1935, Einstein s'est joint à deux jeunes collègues, Boris Podolsky et Nathan Rosen, pour écrire un article savant qui, espérait-il, prouverait que la théorie quantique est erronée. Intitulée *La description de la réalité physique offerte par la mécanique quantique peut-elle être considérée comme complète ?*, la thèse est universellement connue sous l'appellation EPR, qui correspond aux initiales de ses trois auteurs. Dans cet article, on voit une particule se scinder en deux, les nouvelles particules lancées dans des directions opposées. Suivant la théorie quantique, après un moment, l'impulsion des particules n'a plus de valeur absolue, il reste simplement un éventail de probabilités. Si l'on mesure l'impulsion d'une seule particule, elle acquiert une valeur précise et, instantanément, quelle que soit la distance qui les sépare, l'impulsion de l'autre particule doit, pour répondre au principe de conservation de l'impulsion, devenir égale et opposée. On obtient un effet similaire en mesurant la position. Le mémoire EPR conclut sur ces mots : soit la théorie quantique est fausse, et il existe des valeurs cachées qui précisent l'amplitude (et ainsi de suite) avant que la mesure soit prise, soit le principe de localité (selon lequel une chose ne peut agir à distance sur une autre sans qu'il y ait transmission de l'une à l'autre) doit être rejeté. Einstein concluait : « aucune définition raisonnable de la réalité ne permet d'envisager cela ». Pour Einstein, c'était là l'argument massue. Des expériences ultérieures allaient toutefois prouver qu'il avait tort.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

L'expérience de pensée EPR d'Einstein, qui visait à invalider la théorie quantique, a démontré, une fois mise à l'épreuve, qu'Einstein avait tort.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

L'EPR est quelque peu déroutante puisqu'elle fait à la fois référence à l'impulsion et à la position de la particule, ce qui rappelle le principe d'indétermination, mais l'EPR aurait tout aussi bien pu fonctionner avec une seule propriété. Quand Schrödinger a fait valoir que l'utilisation de deux propriétés enlevait tout son sens à leur écrit, Einstein a répondu qu'il n'en avait absolument rien à faire (« *ist mit Wurst* », en allemand populaire, se traduit littéralement « C'est pour moi de la saucisse »).

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER
page 42

LE PRINCIPE D'INDÉTERMINATION D'HEISENBERG
page 48

L'INÉGALITÉ DE BELL
page 100

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

ALBERT EINSTEIN
1879–1955
Physicien allemand qui, bien que sceptique, a contribué à l'élaboration de la théorie quantique.

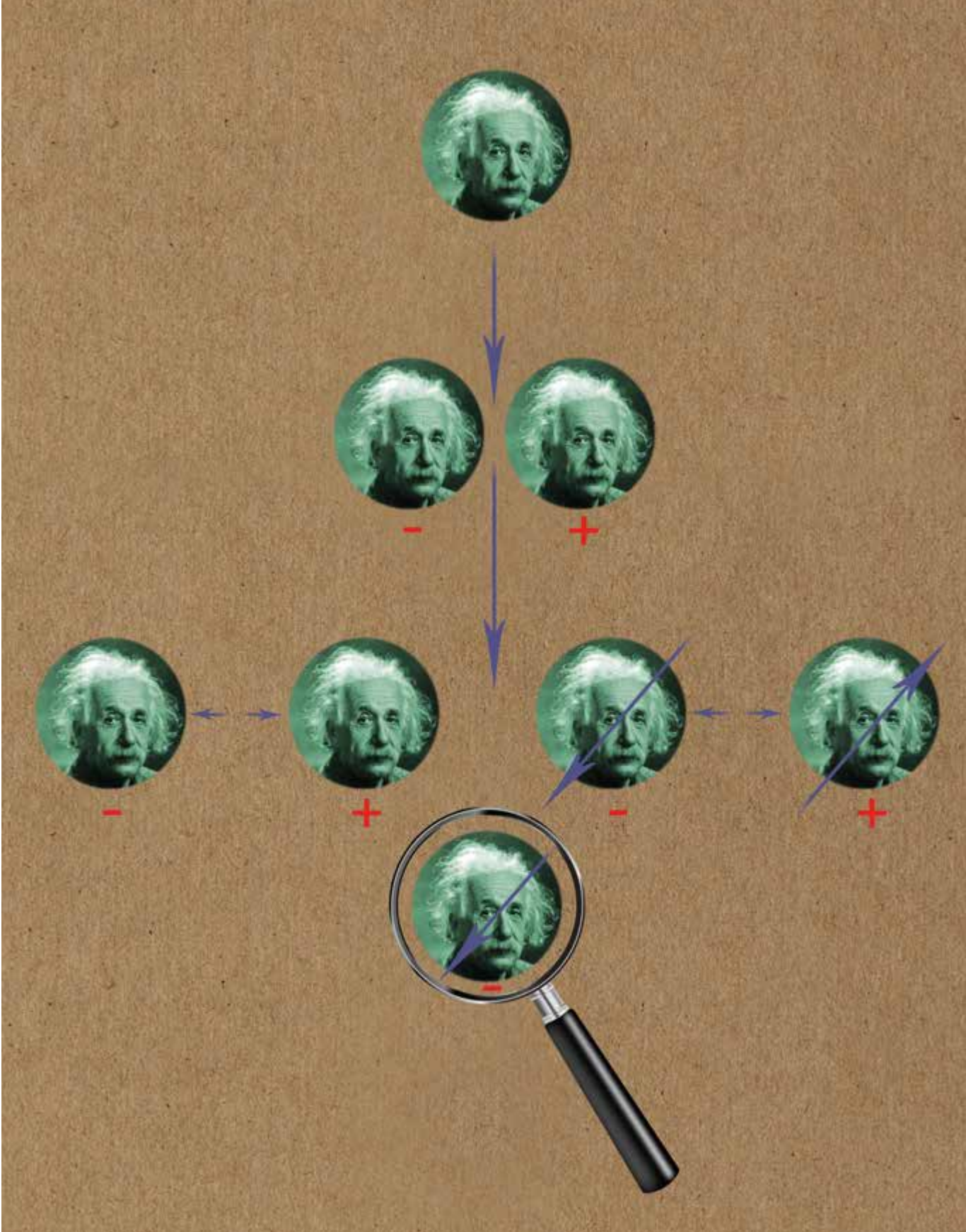
BORIS PODOLSKY
1896–1966
Physicien américain qui aurait rédigé l'expérience de pensée EPR.

NATHAN ROSEN
1909–1995
Scientifique israélo-américain qui a travaillé à l'EPR et qui a ultérieurement élaboré le concept de trou de ver.

TEXTE EN 30 SECONDES

Brian Clegg

Observer la valeur d'une seule particule influe instantanément sur l'autre.



L'INÉGALITÉ DE BELL

Théorie en 30 secondes

L'idée à la base du chat de Schrödinger est une superposition d'états quantiques : le noyau atomique et le chat dans la boîte sont tous deux simultanément dans deux états. En ouvrant la boîte, on découvre le chat mort ou en vie, et le noyau atomique désintégré ou intact. En langage quantique, on dit que le chat et le noyau quantique forment un tout intriqué. Règle générale, deux particules identiques apparues dans un même processus sont dites intriquées et le demeurent même si elles sont séparées par d'énormes distances.

Ces deux particules sont dans une superposition de deux états quantiques, mais si vous mesurez l'une des deux, cette mesure affecte aussitôt l'état quantique de l'autre. Einstein et ses collègues Podolsky et Rosen soutenaient que si deux particules demeurent intriquées sur une longue distance, l'influence physique de l'une sur l'autre doit voyager plus vite que la lumière, ce qui contredit la théorie de la relativité.

En 1964, John Bell a réalisé une mesure qui a permis aux chercheurs de faire la distinction entre un lien établi au moment de la mesure et un autre contenant des « variables cachées » qui fournissent les valeurs permettant une mesure avant que les particules se séparent. Ce facteur distinctif est ce que l'on appelle l'inégalité de Bell. En 1984, Alain Aspect a réalisé une telle expérience sur des photons, confirmant expérimentalement leur intrication.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Einstein n'était pas d'accord avec le concept d'intrication de Schrödinger, mais il n'a pas vécu assez longtemps pour assister aux expériences qui ont donné raison à Schrödinger.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

On peut voir deux particules intriquées comme constituant un seul objet physique, même si elles sont séparées par des années-lumière. Dans l'avenir, l'intrication quantique sera un puissant outil de calcul et de chiffrement des données. Alors que les bits des ordinateurs actuels obéissent à une impulsion électrique, on reliera entre eux les qubits en les intriquant avec des particules subatomiques.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LE CHAT DE SCHRÖDINGER
page 46

L'INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE
page 84

L'INTERPRÉTATION DE BOHM
page 86

L'INTERPRÉTATION DES MONDES MULTIPLES
page 92

L'INFORMATIQUE QUANTIQUE
page 108

BIOGRAPHIE EN 3 SECONDES

ALAIN ASPECT
1947–
Physicien expérimental français qui a prouvé l'intrication quantique.

TEXTE EN 30 SECONDES

Alexander Hellemans

Dans l'expérience de pensée de Schrödinger, le chat en péril est intriqué avec le noyau d'un atome en désintégration.

28 juillet 1928
Naît à Belfast de John Bell et d'Annie Brownlee.

1948
Obtient un diplôme de physique appliquée de l'Université Queen's de Belfast.

1949
Reçoit un diplôme de physique mathématique de l'Université Queen's, puis travaille pour l'Établissement de recherche atomique du Royaume-Uni à Harwell, Oxfordshire.

1954
Épouse Mary Ross.

1956
Termine son doctorat en physique à l'Université de Birmingham.

1960
Déménage avec sa femme pour travailler au CERN, près de Genève.

1964
Publie un article capital, *À propos du paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen*, décrivant l'inégalité de Bell.

1972
Une équipe américaine formée de John Clauser, Abner Shimony, Michael Horne et Richard Holt teste pour la première fois le théorème de Bell, fondement de la théorie quantique, mais sa méthode comporte peut-être une faille.

1982
Le physicien français Alain Aspect élimine cette faille, confirmant ainsi la théorie quantique grâce au théorème de Bell.

1987
Est élu Membre honoraire étranger de l'*American Academy of Arts and Sciences*.

1er octobre 1990
Meurt à Genève, en Suisse.

2008
Création du Prix John Stewart Bell pour la recherche sur les questions fondamentales de la mécanique quantique.

JOHN BELL

Les frères et la sœur de

John Bell ont quitté l'école à 14 ans. Ce fut donc une surprise lorsque le jeune Stewart (tout le monde dans la famille l'appelait par son deuxième prénom pour le distinguer du père) a annoncé vouloir aller à l'université et devenir un scientifique. Cela détonnait quelque peu dans la famille Bell, mais sa mère l'a encouragé ; elle voulait que « le Prof », comme ils l'appelaient parfois, ait une vie « qui lui permettrait de porter ses habits du dimanche à longueur de semaine ! »

Bell est allé à la Belfast Technical High School puis à l'Université Queen's de Belfast. Ensuite, plutôt que de se confiner aux institutions de haut savoir, Bell, financièrement réaliste, s'est trouvé un emploi à l'Établissement de recherche atomique du Royaume-Uni, à Harwell, en Angleterre. Là, il a fait la connaissance de sa future épouse, la physicienne écossaise Mary Ross, et les deux ont décroché un poste au CERN (Organisation européenne pour la recherche nucléaire), près de Genève.

Bien que la physique des particules ait été pour Bell une occupation alimentaire, une année sabbatique, en 1963, fut l'occasion rêvée de réfléchir à la théorie quantique, qui l'avait toujours fasciné. Bell était plutôt d'accord avec les réticences d'Einstein, mal à l'aise face à la théorie quantique, qui soutenait qu'il doit y avoir une réalité sous-jacente à l'aléatoire. Il a déjà déclaré à propos de la physique quantique : « J'hésitais à la croire erronée, mais je savais qu'elle était pourrie. »

L'expérience de pensée EPR d'Einstein (page 98) avait démontré qu'il y avait une grande faille dans la théorie quantique, ou alors que la réalité locale était fausse. La réalité locale supposait un monde qui n'était pas soumis aux probabilités et qui ne se prêtait pas à une quelconque communication instantanée de particules éloignées. Bell a proposé sa propre expérience de pensée, offrant une mesure qui allait permettre de faire la distinction entre les deux possibilités. C'était un théoricien, et il ne voyait pas trop comment cette mesure pouvait être concrétisée, mais ce qu'on appelait alors le théorème de Bell était devenu un point de référence : grâce à lui, on pouvait vérifier la validité des extraordinaires affirmations de la théorie quantique. Si les résultats en laboratoire débordaient du champ statistique– ce qu'on appelle l'inégalité de Bell – alors le théorème de Bell était confirmé, et la réalité locale condamnée.

Des tests ultérieurs visant le théorème de Bell ont démontré qu'Einstein et Bell – dans sa conviction personnelle – avaient tort : la théorie quantique avait tout l'air d'être correcte, et elle violait effectivement la réalité locale. Une mort prématurée et inattendue à l'âge de 62 ans mit abruptement fin à la carrière du scientifique réfléchi et inspiré qu'était Bell.

LE CHIFFREMENT QUANTIQUE

Théorie en 30 secondes

Depuis l'origine de la communication écrite, on a tenté de protéger la confidentialité de certains messages. Beaucoup de codes et de messages chiffrés sont faciles à décrypter, mais la méthode de chiffrement infaillible existe : le carnet de clés à usage unique. Il s'agit d'associer une valeur aléatoire à chaque caractère à chiffrer. Le résultat est un texte vraiment aléatoire, qui ne peut être décodé qu'avec la clé. On utilise peu cette méthode parce ce qu'il est trop facile, avec l'espionnage, de mettre la main sur le carnet de clés. Or il se trouve que la physique quantique peut résoudre le problème. La cryptographie quantique a vu le jour grâce à Charles Bennett et Gilles Brassard, qui se sont servi, comme clé, de la polarisation de photons séparés. Ils ont inventé le carnet de clés à chiffrement unique, mais des problèmes techniques ont fait qu'il demeurait vulnérable à de possibles interceptions. L'intrication quantique, quant à elle, fournit un carnet de clés dont l'existence tient à l'envoi du message. Le plus souvent, l'aspect aléatoire de la valeur communiquée instantanément par l'intrication quantique est un inconvénient. Mais si cette valeur aléatoire sert de clé, elle pourra décoder le message aussitôt qu'il sera chiffré. Qui plus est, il est possible de vérifier si les particules sont toujours intriquées, donc le système détecte automatiquement toute interception de la clé quantique.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Les particules quantiques, surtout celles qui sont intriquées, constituent de puissants vecteurs de données secrètes fournissant leur propre carnet de clés à usage unique.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

En 2004, Anton Zeilinger, un physicien expérimental avant-gardiste dont les travaux portent sur l'intrication quantique, a fait l'expérience d'un carnet de clés à usage unique, et ce qu'il a réalisé bat tous les records établis en laboratoire en termes d'avancée scientifique. Il a relié par les égouts, sur une distance de 1 600 pieds (500 mètres), l'Hôtel de Ville et la Banque d'Autriche de Vienne et, après en avoir obtenu l'autorisation, il a utilisé un message chiffré par intrication pour transférer 3 000 euros des fonds du maire de Vienne vers le compte de l'université.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LE SPIN QUANTIQUE
page 38

L'EPR
page 98

L'INÉGALITÉ DE BELL
page 100

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

CHARLES H. BENNETT
1943–
Physicien et théoricien de l'information américain travaillant principalement pour IBM.

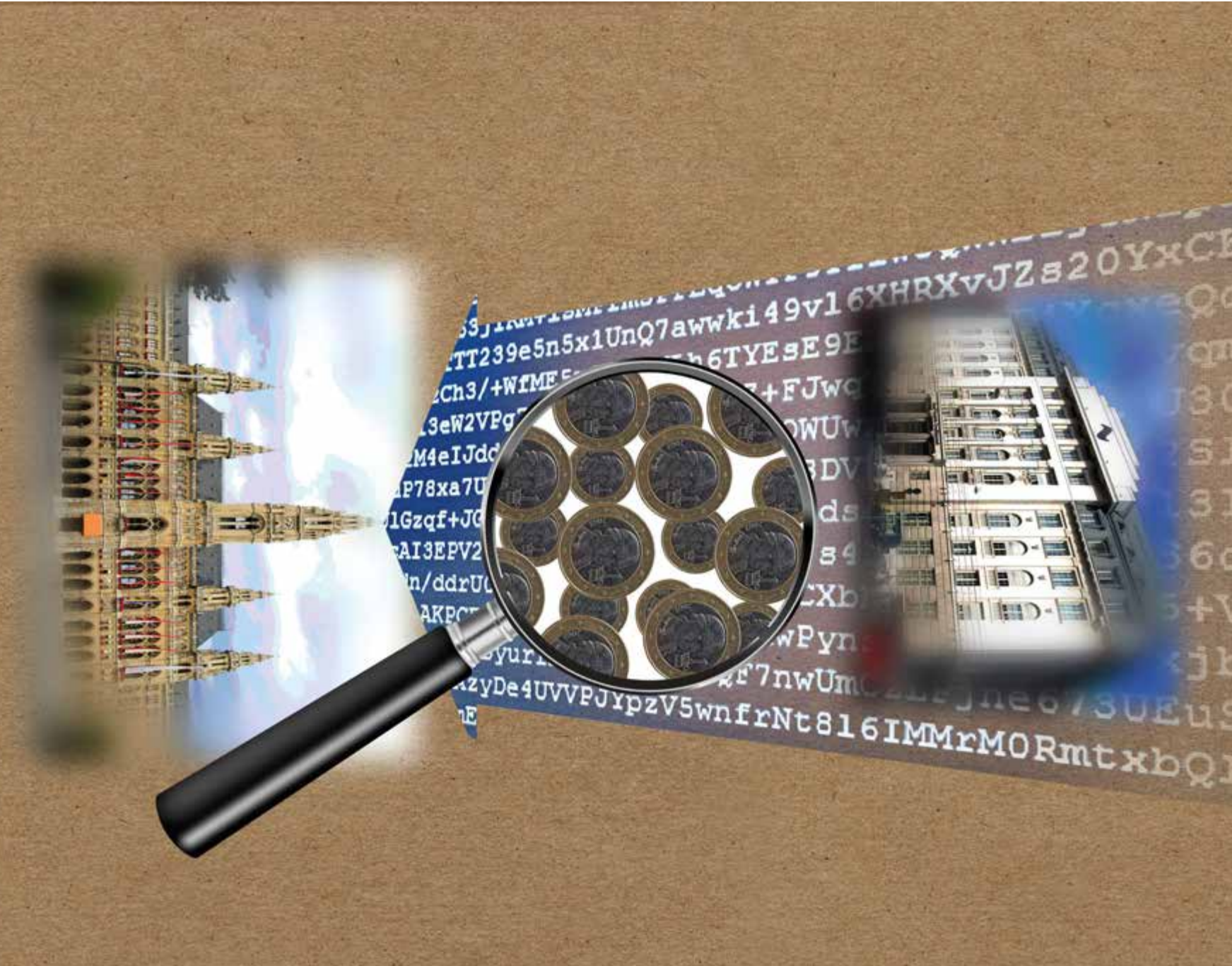
ANTON ZEILINGER
1945–
Physicien des quantas autrichien spécialiste de l'intrication ayant un don pour les démonstrations spectaculaires.

GILLES BRASSARD
1955–
Informaticien et cryptographe canadien-français.

TEXTE EN 30 SECONDES

Brian Clegg

Le chiffrement quantique a été utilisé à Vienne, en 2004, pour sécuriser un transfert d'argent électronique.


TT239e5n5x1UnQ7awwki49v16XHRXvJZs20YxCE
Ch3/+WfME
3eW2VPg
M4eIJdd
P78xa7U
1Gzqf+JG
AI3EPV2
n/ddrU
AKPC
zyDe4UVVPJYpzV5wnfrNt816IMMrM0RmtxbQ

LES BITS QUANTIQUES (QUBITS)

Théorie en 30 secondes

Les électrons ont une propriété quantique appelée le spin. Ils peuvent tournoyer dans le sens des aiguilles d'une montre ou en sens inverse, et c'est le spin de l'électron qui explique le magnétisme de certains matériaux. En soumettant les électrons à une impulsion laser, on peut les amener dans un état de superposition, c'est-à-dire qu'ils endossent les deux états quantiques simultanément : les électrons, au lieu d'avoir un spin dans une direction donnée, ont uniquement des probabilités de spin simultané dans chaque direction. Les deux directions du spin peuvent se voir attribuer les valeurs 0 et 1 équivalant aux valeurs 0 et 1 du bit d'un ordinateur classique, mais la superposition et les probabilités qui y sont associées font que ce système, appelé le bit quantique, ou qubit, contient plus d'informations. Les photons, susceptibles de polarisations à la fois horizontales et verticales, et les noyaux atomiques, quand ils endossent deux états simultanés de spin nucléaire, sont d'autres exemples de qubits. L'état de superposition est très fragile : la moindre perturbation, comme une tentative de détection de l'état quantique de la particule subatomique, le ramène à un état de non-superposition, phénomène appelé décohérence. L'intrication quantique joue un rôle important dans l'utilisation des qubits : elle permet de lier des données sans provoquer la décohérence.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Les qubits se comportent comme des bits. Ils peuvent être ouverts ou fermés, mais en réalité ils peuvent être *à la fois* ouverts et fermés

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Les qubits seront au cœur des futurs ordinateurs quantiques. Tout système ou particule pouvant endosser deux états quantiques ou plus peut fonctionner comme un qubit. Les chercheurs utilisent plusieurs techniques pour créer des qubits. Par exemple, ils enferment des électrons dans des points quantiques et modifient leur spin avec des rayons laser. On peut aussi modifier le spin des noyaux atomiques avec des ondes radio, celles des appareils d'IRM, par exemple. Serge Haroche a inventé le stockage de données quantiques en emprisonnant des photons dans des cavités micro-ondes.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LE CHAT DE SCHRÖDINGER
page 46

LA DÉCOHÉRENCE
page 52

L'INFORMATIQUE QUANTIQUE
page 108

LES APPAREILS D'IRM
page 124

LES POINTS QUANTIQUES
page 130

BIOGRAPHIE EN 3 SECONDES

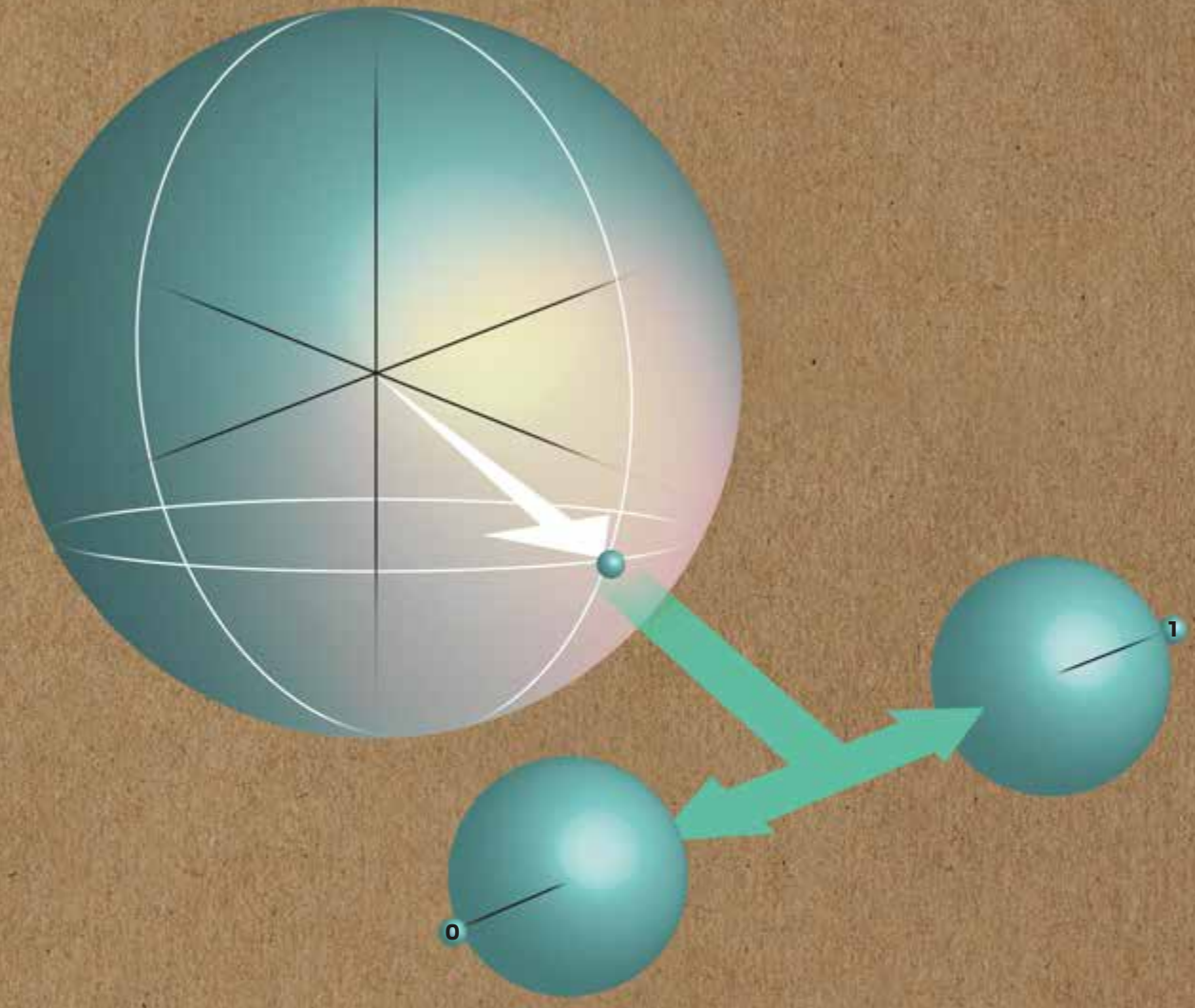
SERGE HAROCHE
1944–

Physicien français dont les expériences réalisées en physique quantique lui ont valu, avec David J. Wineland, le prix Nobel de physique de 2012.

TEXTE EN 30 SECONDES

Alexander Hellemans

La mesure d'un spin donne toujours « up » ou « down » ; c'est le qubit sous-jacent à l'état probabiliste qui déterminera lequel des deux ce sera.


1
0

L'INFORMATIQUE QUANTIQUE

Théorie en 30 secondes

Les ordinateurs actuels contiennent des millions de petits transistors utilisant une charge électrique pour stocker des données sous forme de bits. La présence d'une charge correspond à 1, et son absence à 0 ; on appelle cette information un chiffre binaire, ou « bit ». Les ordinateurs traitent les nombres sous forme d'alignements de bits qui peuvent être chacun ouverts ou fermés. Par exemple, avec 4 bits, on peut représenter ainsi les chiffres de 0 à 7 : 0000, 0001, 0011, 0111, 1111, 1110, 1100 et 1000. Un ordinateur classique traite ces données une par une. Mais 4 qubits, chacun étant une superposition de 0 et 1, représenteront ces 8 chiffres simultanément, ce qui permet de les traiter en parallèle. Mais l'incroyable puissance des ordinateurs quantiques apparaît quand on augmente le nombre de qubits : 10 qubits permettent le traitement simultané de 1 023 nombres. L'énorme potentiel de capacité de calcul des ordinateurs quantiques est simplement ahurissant : 20 qubits peuvent traiter un million de calculs parallèles ; avec 40 qubits, le nombre de calculs passe à un million de millions. La création de qubits qui demeurent intriqués nécessitera de nouvelles technologies, mais les chercheurs veulent vraiment utiliser un grand nombre de qubits et ainsi obtenir cette formidable puissance de calcul.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Les qubits joueront un rôle capital dans les ordinateurs quantiques parce qu'ils permettront le traitement parallèle des données à très grande échelle.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Richard Feynman a émis l'hypothèse que de petits ordinateurs mécaniques quantiques pourraient simuler des systèmes quantiques. Outre la modélisation du processus physique, les ordinateurs quantiques battront tous les records en mathématiques. Par exemple, ils pourront gérer des nombres de 400 chiffres en quelques secondes, déchiffrant ainsi les clés de chiffrement utilisées par les banques.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LE SPIN QUANTIQUE
page 38

LA DÉCOHÉRENCE
page 52

L'INÉGALITÉ DE BELL
page 100

LES BITS QUANTIQUES (QUBITS)
page 106

LES POINTS QUANTIQUES
page 130

BIOGRAPHIE EN 3 SECONDES

RICHARD FEYNMAN
1918–1988

Physicien américain qui a proposé l'utilisation d'ordinateurs obéissant aux lois de la mécanique quantique.

TEXTE EN 30 SECONDES

Alexander Hellemans

Dans un ordinateur quantique, les bits quantiques, dits qubits, remplacent les bits classiques pour assurer des calculs parallèles.

LA TÉLÉPORTATION QUANTIQUE

Théorie en 30 secondes

Par une nuit noire sans lune, des scientifiques ont établi un nouveau record de téléportation quantique : 144 kilomètres. À l'aide d'un laser, ils ont fait circuler des photons entre différentes îles des Canaries. Ces photons étaient étroitement liés les uns aux autres grâce à l'intrication quantique, de sorte qu'une action sur l'un d'eux se répercutait instantanément sur le photon partenaire, peu importe sa distance. L'équipe, dirigée par Anton Zeilinger de l'Université de Vienne, a envoyé dans les airs une des paires de photons intriqués vers un détecteur situé sur l'île voisine. Puis, elle a utilisé cette paire de photons comme ligne de transmission quantique pour envoyer de l'information sur un autre objet quantique afin de le reconstruire à l'autre bout de la ligne. Comme la téléportation quantique a un petit air de science-fiction, elle a tout de suite piqué la curiosité quand Charles Bennett, travaillant chez IBM, l'a proposée pour la première fois en 1993.
Elle fait dorénavant partie des programmes de recherche et est appliquée dans les technologies quantiques du calcul et des télécommunications. Les scientifiques ont maintenant les yeux tournés vers l'espace : si l'on pense à un réseau de communications quantique à l'échelle planétaire, la téléportation en direction de satellites peut s'avérer capitale.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES
En téléportation quantique, toute l'information sur un objet quantique est scannée puis reconstituée à un autre endroit en utilisant des particules intriquées qui forment les deux extrémités d'une ligne de transmission quantique

RÉFLEXION EN 3 MINUTES
La téléportation quantique ne permet pas de communications à une vitesse supérieure à celle de la lumière, car pour reconstituer un objet quantique à l'autre bout de la ligne, on a besoin de consignes de la part de l'émetteur, et celles-ci sont envoyées sur des lignes de transmission classiques. Mais elle contourne bien la règle du non-clonage, qui interdit de faire une copie à l'identique d'un objet quantique. Au lieu de cela, la téléportation fonctionne en changeant le lieu où loge l'information quantique et en détruisant l'original au cours du processus.

THÉORIES LIÉES
Voir aussi
LA THÉORIE DES CHAMPS QUANTIFIÉS
page 64

RECULER DANS LE TEMPS
page 72

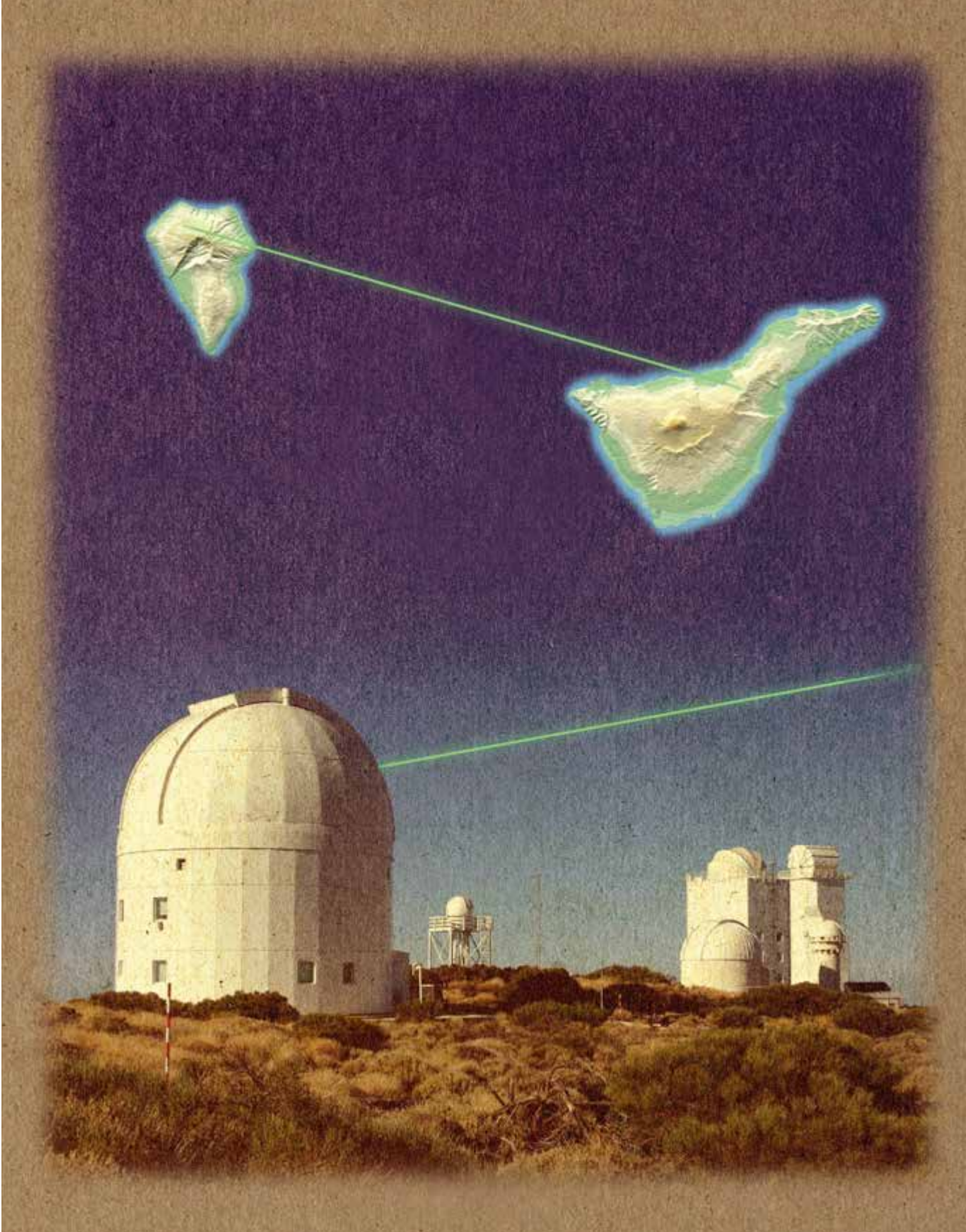
LE TRANSISTOR
page 120

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES
CHARLES H. BENNETT
1943–
Professeur au centre de recherches d'IBM dont les travaux portent principalement sur la relation entre physique et informations.

ANTON ZEILINGER
1945–
Physicien quantique autrichien et directeur de l'équipe qui a mené les premières expériences de téléportation quantique sur de longues distances.

TEXTE EN 30 SECONDES
Sophie Hebden

La téléportation quantique entre les îles Canaries a précédé les communications satellitaires.



L'EFFET ZÉNON QUANTIQUE

Théorie en 30 secondes

Le philosophe antique Zénon a formulé un certain nombre de paradoxes prouvant que le mouvement est impossible. En physique classique, il est facile d'écarter ces paradoxes en les qualifiant de sophismes. Mais en 1977, George Sudarshan et l'un de ses collègues de l'Université du Texas ont établi un parallèle entre le fait qu'une flèche décochée n'a pas l'air de se déplacer si l'on isole un moment dans le temps et un phénomène quantique peu connu appelé de nos jours « l'effet Zénon quantique ». Comme les exemples tirés du monde réel ont tendance à être compliqués, il est plus facile d'illustrer l'effet Zénon quantique en se servant d'une expérience de pensée. La probabilité qu'un atome radioactif se désintègre dans un intervalle de temps donné est souvent décrite comme constante mais, strictement parlant, c'est faux. Aussitôt que l'atome a été aperçu dans son intégrité, la vitesse de sa désintégration est égale à 0, bien qu'il s'empresse d'atteindre sa valeur « constante ». Mais si une autre observation a été réalisée avant que tout cela ait eu l'occasion de se produire, alors la vitesse de la désintégration est ramenée à 0… et ainsi de suite, tant que se répètent les observations. Il n'est peut-être pas vrai qu'une bouilloire que l'on surveille ne bout jamais, mais un atome mis en observation ne se désintègre jamais !

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Si l'on observe un système quantique assez fréquemment, il ne changera pas d'état, et ce, même si le système est instable.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Depuis qu'on a découvert l'effet Zénon quantique, les physiciens ont tenté de lui trouver des applications pratiques. Mais il se peut que la Nature les ait précédés : une théorie veut que les oiseaux migrateurs puissent détecter le champ magnétique terrestre en utilisant des paires d'électrons intriqués situés dans leurs yeux. Cependant, ce qui n'est pas clair, c'est comment ces oiseaux maintiennent cet état d'intrication assez longtemps pour faire fonctionner ce mécanisme. La réponse est peut-être qu'ils exploitent l'effet Zénon quantique.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA RÉDUCTION DE LA FONCTION D'ONDE
page 50

LA RÉDUCTION PAR LA CONSCIENCE
page 90

L'INFORMATIQUE QUANTIQUE
page 108

LA BIOLOGIE QUANTIQUE
page 150

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

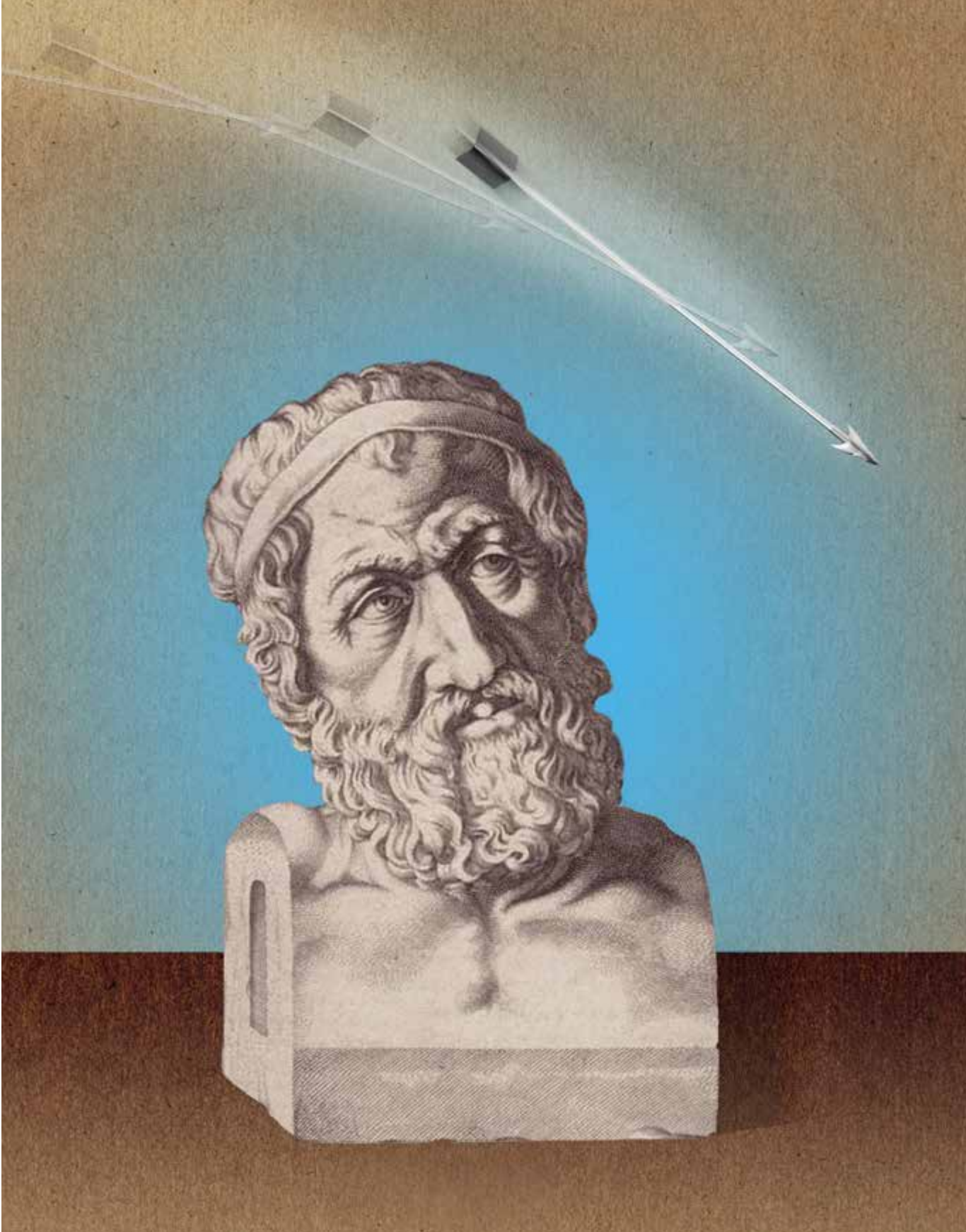
ZÉNON D'ÉLÉE
5e s. av. J.-C.
Philosophe grec qui a émis l'hypothèse qu'une observation précise pouvait figer une flèche en plein vol.

E. C. GEORGE SUDARSHAN
1931–
Physicien indien et chercheur prolifique en optique quantique et en physique fondamentale.

TEXTE EN 30 SECONDES

Andrew May

La flèche de Zénon semblait s'immobiliser quand on l'observait, et une particule quantique ne se désintègre pas quand on l'observe.



APPLICATIONS QUANTIQUES

APPLICATIONS QUANTIQUES
GLOSSAIRE

bande de conduction La gamme des énergies d'un électron d'un atome dans un matériau qui permet à l'électron de se mouvoir librement à travers le matériau.

bande de valence La bande des électrons toujours liés à l'atome, à quoi l'on doit plusieurs propriétés chimiques de l'atome.

caméra CCD Caméra à coupleur de charge, où une batterie de pixels accumulent, chacun de leur côté, une charge électrique au fur et à mesure que des photons les frappent.

circuit intégré Une « puce », c'est-à-dire une plaquette d'un semi-conducteur, le plus souvent en silicium, sur laquelle est imprimé un circuit électronique.

dopage Le fait d'ajouter une impureté à un semi-conducteur pour changer ses propriétés électriques. Cela facilite la tâche de l'électron voulant atteindre la bande de conduction ou être introduit dans la bande de valence.

émission stimulée Le mécanisme à la base du laser : l'excitation d'un atome avec un éclat de lumière ou un courant électrique. Lorsqu'il est frappé par un intrant photonique, l'atome en libère un second de fréquence identique.

indice de réfraction La mesure du degré de déviation que subit la lumière lorsqu'elle passe entre une substance et un autre matériau. L'indice de réfraction est lié à la vitesse de la lumière dans le matériau.

jonction de Josephson Paire de supra-conducteurs séparés par une fine couche. Si la jonction est mise sous tension, la tension provoque une oscillation à haute fréquence, permettant une mesure extrêmement précise du voltage.

laser à diodes Laser produisant de la lumière par émissions stimulées d'un semi-conducteur. Ce type de laser est utilisé en télécommunications, dans les CD et DVD, dans les imprimantes et dans les pointeurs laser.

laser à semi-conducteur Voir *laser à diodes*

loi de Moore Remarque faite en 1965 par Gordon Moore, fondateur d'Intel, selon laquelle la capacité des composants électroniques est chaque année multipliée par deux. La prédiction a été revue pour dire que la capacité double tous les 18 à 24 mois. Elle s'est avérée remarquablement exacte, bien que cette progression ait un peu ralenti dernièrement.

métamatériau Un matériau composite artificiel doté de propriétés électromagnétiques inhabituelles. Plusieurs métamatériaux ont un indice de réfraction négatif, ce qui leur confère une capacité de fabriquer des lentilles extrapuissantes, ou de dissimuler un objet en réfractant la lumière autour de lui (processus baptisé *cloaking* [cape d'invisibilité]).

nanoparticule Petit morceau de matériau ayant un diamètre d'un centième de nanomètre. À cette échelle, les objets ont des propriétés physiques très différentes de celles des particules plus grandes.

paire de Cooper Une paire de fermions (le plus souvent des électrons) qui se comportent comme une particule unique, reliés l'un à l'autre par une interaction avec des vibrations du matériau à travers lequel ils passent. Les paires de Cooper sont responsables des basses températures de la supraconductivité.

photonique Équivalent optique de l'électronique. Technique de contrôle, de commande et d'amplification de la lumière.

principe d'exclusion de Pauli Principe selon lequel deux fermions du même genre ne peuvent pas être dans un même état quantique en même temps. Ainsi, les électrons d'un même atome ne peuvent avoir les mêmes nombres quantiques.

résonance Tendance qu'a un système à vibrer plus fortement à certaines fréquences. On peut l'appliquer à un objet, comme une cloche, ou à une cavité, comme un tuyau d'orgue ou une cavité de laser.

SQUID Dispositif supraconducteur à interférence quantique utilisant les jonctions de Josephson pour détecter les variations de voltage produites par un champ magnétique variable. Les SQUID servent à fabriquer des magnétomètres de haute sensibilité que l'on utilise dans diverses applications allant de l'appareil d'IRM aux détecteurs de bombes non éclatées.

supraconductivité Capacité qu'ont certains matériaux extrêmement froids de faire passer un courant électrique sans résistance aucune et de dégager un champ électromagnétique.

treillis photonique Matériau formant un treillis régulier agissant sur la lumière comme les semi-conducteurs agissent sur les électrons. On s'en sert pour fabriquer des lentilles à haute définition ; dans la nature, ce sont les volutes de l'opale et l'irisation de la queue du paon.

LE LASER

Théorie en 30 secondes

On se sert des lasers tous les jours.

Ils scannent nos codes-barres au supermarché et ils sont un composant essentiel de nos lecteurs CD et DVD. Cela paraîtra surprenant, mais ces appareils quotidiens sont des appareils quantiques : ils dépendent des niveaux d'énergie exceptionnels des atomes qui les constituent. Les électrons d'un atome peuvent être « excités » vers des valeurs différentes, précises, en absorbant l'énergie émise par la chaleur ou la lumière. Mais un atome ne peut être excité en permanence. Il libère donc cette énergie puis retrouve son état énergétique « de base ». Qu'arrive-t-il si un atome déjà excité rencontre un photon ? Au lieu de l'absorber et de le relâcher n'importe quand dans n'importe quelle direction, comme avant, une sorte d'effet de résonance pousse l'atome à émettre un second photon. Ce dernier a exactement la même direction de fréquence, et se retrouve en cohérence – position parfaite – avec le photon incident. Dans un laser, c'est avec un haut voltage qu'on arrive à exciter un groupe d'atomes de façon à ce que les atomes excités dépassent en nombre ceux demeurés dans leur état de base. Réfracter les photons émis sur des miroirs, dans une cavité, stimule de nouvelles émissions qui provoquent un puissant rayon laser.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Un laser est une source de lumière qui fonctionne avec l'émission stimulée (ou conjointe) de plusieurs atomes, de manière à produire un rayon monochromatique, fortement directionnel et hautement sophistiqué.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Le laser manié par le personnage du Dr Terreur de la série Austin Powers utilise probablement comme matériau un gaz de dioxyde de carbone, car il émet dans l'infrarouge, et ferait donc frire tout objet sur lequel il tomberait. La grande majorité des lasers existants sont des lasers à diodes ou à semi-conducteurs, beaucoup moins puissants, utilisés dans des appareils électroniques ou de communication.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LES QUANTA DE PLANCK
page 18

LA SÉRIE PRÉVISIBLE DE BALMER
page 22

L'ATOME DE BOHR
page 24

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

GORDON GOULD
1920–2005

Physicien américain qui a inventé l'acronyme LASER, qui signifie *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplification de la lumière par émission stimulée de radiations).

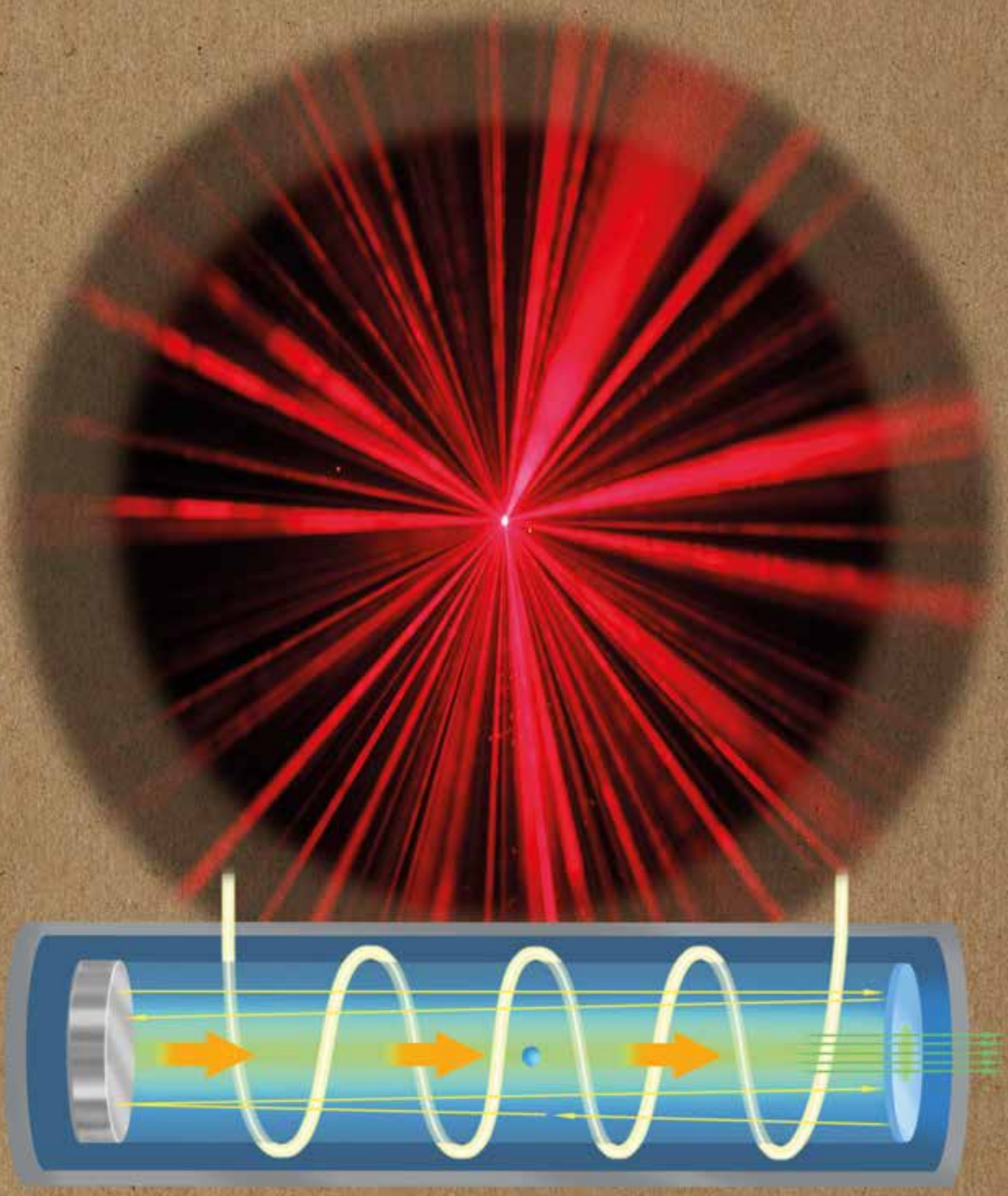
THEODORE MAIMAN
1927–2007

Physicien américain qui a peut-être inventé le premier laser optique fonctionnel (d'autres disent qu'il s'agit plutôt de Gould).

TEXTE EN 30 SECONDES

Sophie Hebden

Pour produire des photons cohérents, les lasers utilisent à répétition des cavités réfléchissantes stimulant les atomes.



LE TRANSISTOR

Théorie en 30 secondes

Les particularités de la théorie

quantique – le principe d'indétermination, les superpositions et la supraconductivité, par exemple – se manifestent le plus souvent dans des conditions de basse température spécifiques. Mais les effets d'une quantification discrète des états d'énergie sont constants, et on les remarque notamment dans les liens entre les atomes et la couleur des objets. L'une des plus importantes applications technologiques de cette quantification est le transistor, composant électronique fait d'un semi-conducteur et qui est à la base de tout calcul numérique et des technologies de l'information. Le matériau semi-conducteur contient des électrons situés dans une « bande » d'états énergétiques quantiques, un peu comme un réservoir entièrement rempli d'eau, séparée d'une autre bande sans électrons par un vide énergétique. Si les électrons arrivent à acquérir assez d'énergie pour rejoindre la bande vide, ils peuvent se déplacer tout autour et être porteurs d'une charge électrique. Dans les conditions de fonctionnement normal d'un transistor, seuls quelques électrons peuvent tirer assez d'énergie de la chaleur ambiante pour y arriver, ce qui veut dire que le flux électrique peut être finement contrôlé par dopage ou en appliquant des champs électriques. Le courant qui passe par un transistor peut ainsi être contrôlé et dirigé électriquement de façon à ce qu'il joue le rôle de commutateur ou d'amplificateur en électronique numérique.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Les transistors, qui sont le cœur de l'électronique numérique et des ordinateurs, exploitent la quantification des états énergétiques de l'électron dans les matériaux semi-conducteurs.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Les premiers transistors commerciaux, faits de germanium, coûtaient plusieurs dollars dans les années 1960, et leur diamètre était d'environ 12 mm. La miniaturisation des transistors en silicium est telle qu'une seule puce de microprocesseur de silicium peut en contenir environ 2 milliards, à un coût moyen de 0,0001 cent la pièce. Cette chute des coûts est une des illustrations de la Loi de Moore (voir page 116).

THÉORIES LIÉES

Voir aussi
LE LASER
page 118

LES POINTS QUANTIQUES
page 130

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

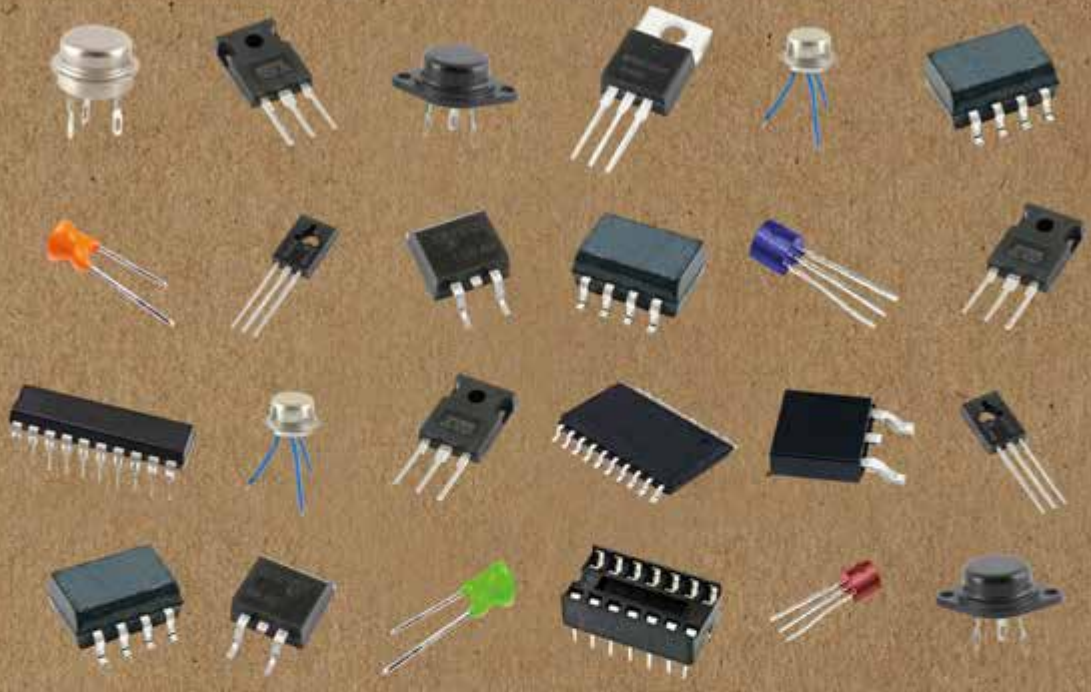
WALTER BRATTAIN, JOHN BARDEEN et WILLIAM SCHOCKLEY
1902–1987, 1908–1991 et 1910–1989

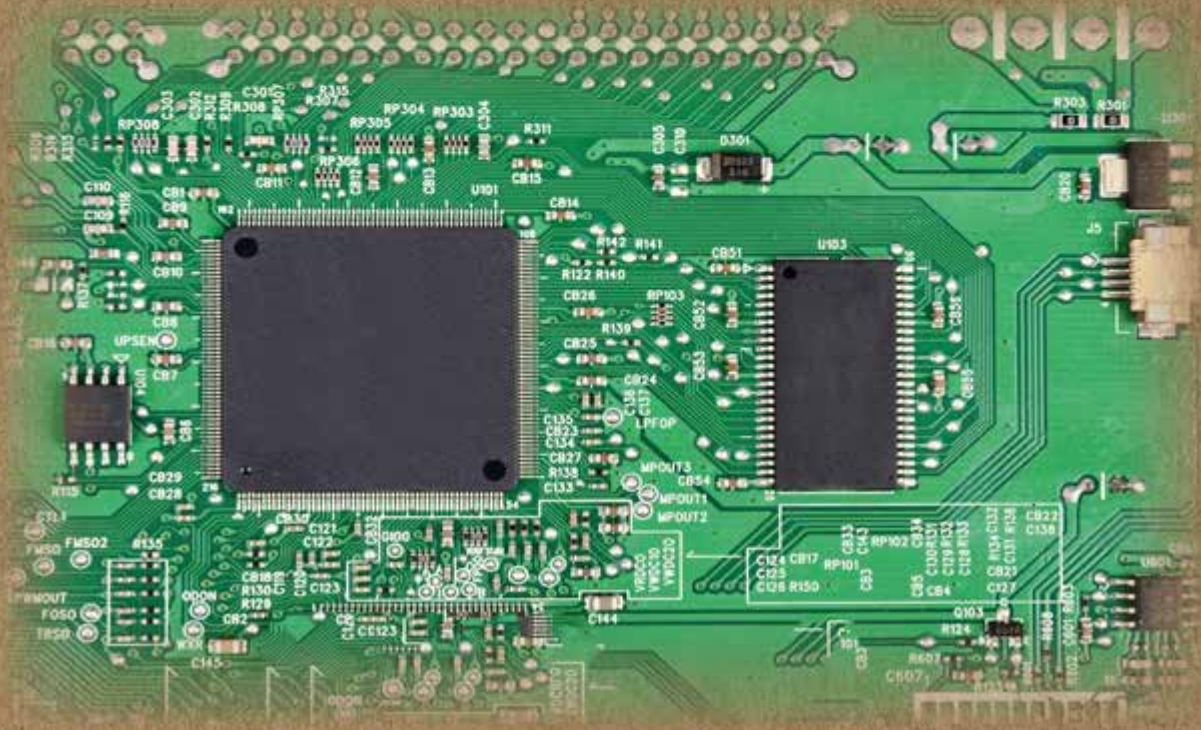
Physiciens américains, membres de l'équipe qui a inventé le transistor au laboratoire de téléphonie Bell en 1947, ce qui leur a valu le prix Nobel de physique en 1956.

TEXTE EN 30 SECONDES

Philip Ball

Le transistor a bouleversé l'électronique, depuis les composants électroniques jusqu'aux circuits intégrés.




RP308
RP305
RP304
RP303
R311
U101
D301
R303
R301
J5
U103
RP103
R139
UPSEN
LPFOP
MPOUT3
MPOUT1
MPOUT2
RP102
RP101
FMSO
FMOUT
FOSO
TRSO
ODON
R129
R130
C144
C145
Q103
R124

LE MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE

Théorie en 30 secondes

Le microscope électronique

fonctionne presque de la même façon que le microscope optique. Dans un microscope optique, un collimateur dirige un faisceau lumineux sur une plaquette de verre où l'on a déposé, par exemple, des bactéries. La lumière est alors captée par un objectif qui agrandit l'image et la redirige vers un oculaire ou une caméra CCD. Un microscope électronique fonctionne de la même façon, mais ce sont des aimants et non des lentilles de verre qui font dévier les électrons. Une cathode chauffée produit des électrons, dont la course est alors accélérée par un champ électrique, exactement comme dans un tube à rayons cathodiques. Un collimateur magnétique rassemble les électrons sur l'échantillon et, guidés par d'autres lentilles magnétiques, les électrons qui passent au travers l'échantillon convergent vers un écran fluorescent où ils forment une image visible. La résolution du microscope optique est limitée par la longueur d'onde de la lumière, et son grossissement est limité à 2 000 ; tout ce qui est plus petit que la longueur d'onde de la lumière, comme les virus, demeure invisible. Les microscopes électroniques peuvent grossir jusqu'à 10 millions de fois, et permettent de voir des objets beaucoup plus petits, comme des virus et même des atomes.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Parce que les électrons ont une longueur d'onde beaucoup plus courte que celle des photons, leur amplification est beaucoup plus élevée que celle de leurs homologues optiques.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Le microscope électronique prouve la nature double de l'électron. Quand il passe à travers des lentilles magnétiques, son chemin se courbe et il se comporte alors comme une particule. Lorsqu'il passe à travers un échantillon, l'électron est réfracté puis plie autour de l'obstacle, comme une onde : il se courbe beaucoup moins et produit alors une image beaucoup plus nette. Aujourd'hui, les biologistes peuvent voir des composantes cellulaires qui étaient invisibles avec les microscopes optiques ; sans le microscope électronique, la nanotechnologie serait impossible.

THÉORIE LIÉE

Voir aussi
LA DUALITÉ ONDE/PARTICULE
page 28

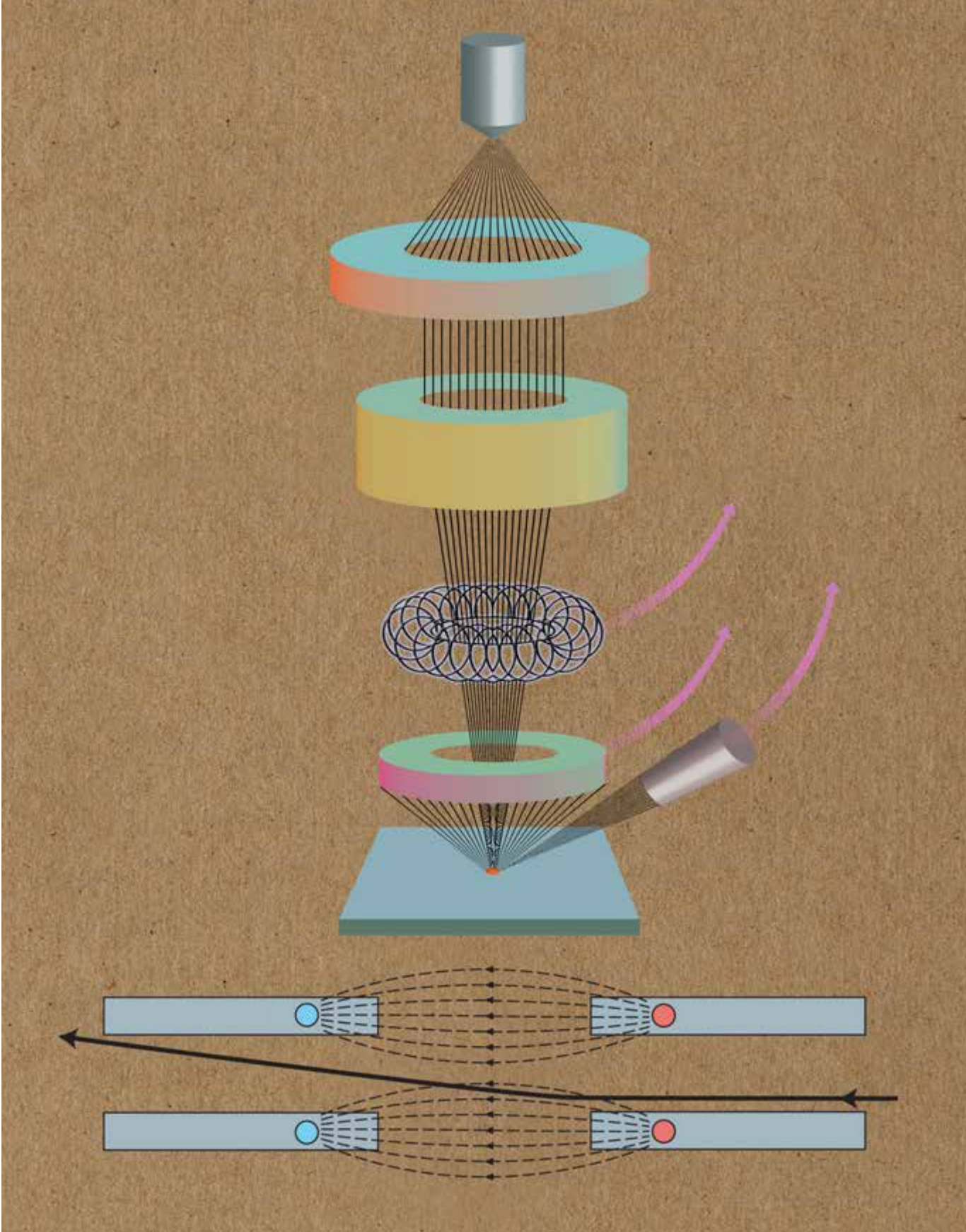
BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

MAX KNOLL et ERNST RUSKA
1897–1969 et 1906–1988
Ingénieur électricien et physicien allemands qui, les premiers, ont conçu le dispositif qui a permis la construction, en 1931, du microscope électronique.

TEXTE EN 30 SECONDES

Alexander Hellemans

Le champ magnétique d'un microscope électronique fait converger les électrons comme le font les lentilles avec la lumière visible.



LES APPAREILS D'IRM

Théorie en 30 secondes

Dans les années 1970, des chercheurs, dont le physicien américain Raymond Damadian, le chimiste américain Paul Lauterbur et le physicien britannique Peter Mansfield, ont mis au point l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Cette méthode permet de voir, sans intervention chirurgicale, les tissus délicats à l'intérieur du corps. Elle rend donc possibles des diagnostics de maladies et de blessures, y compris les cancers et les ligaments déchirés. À l'intérieur de l'appareil d'IRM, le patient est enveloppé d'un champ magnétique 30 000 à 60 000 fois plus puissant que celui de la terre. On obtient cette puissance avec un aimant, le plus souvent un électro-aimant supraconducteur. Notre corps est composé de 65 % d'eau, et chaque atome d'hydrogène de cette eau contient un photon qui tourne comme une toupie, transformant chaque proton en petit aimant. Le puissant champ magnétique de l'appareil amène les protons à tournoyer d'une façon particulière. Les ondes radio envoyées dans le corps du patient influent sur le tournoiement des protons, et changent donc leur magnétisme. Lorsque l'on interrompt de nouveau le flux des ondes radio, les protons « se reposent » en retrouvant leur tournoiement d'origine ; les signaux qu'ils émettent alors sont enregistrés électroniquement. Les logiciels de l'ordinateur transforment donc en images cette information ainsi que les autres signaux détectés, ce qui permet de voir les différents tissus.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Les images détaillées de nos organes et tissus internes montrées par les appareils d'IRM ont révolutionné le traitement de plusieurs maladies et blessures.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Il existe une autre version de l'IRM, appelée IRM fonctionnelle ou IRMf, qui montre quelles régions du cerveau s'activent quand on fait bouger une partie de notre corps ou que l'on réagit à une image. On utilise parfois l'IRMf pour planifier une intervention chirurgicale au cerveau, ce qui aide le chirurgien à protéger les aires essentielles quand il procède à l'ablation d'une tumeur cancéreuse ou d'une région malade. L'IRMf nous en apprend chaque jour davantage sur la maladie d'Alzheimer et les scléroses en plaques, et il montre les effets des médicaments sur le cerveau.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LE SPIN QUANTIQUE
page 38

LES SUPRACONDUCTEURS
page 140

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

HEIKE KAMERLINGH ONNES
1853–1926

Chercheur hollandais qui a découvert la supraconductivité en 1911.

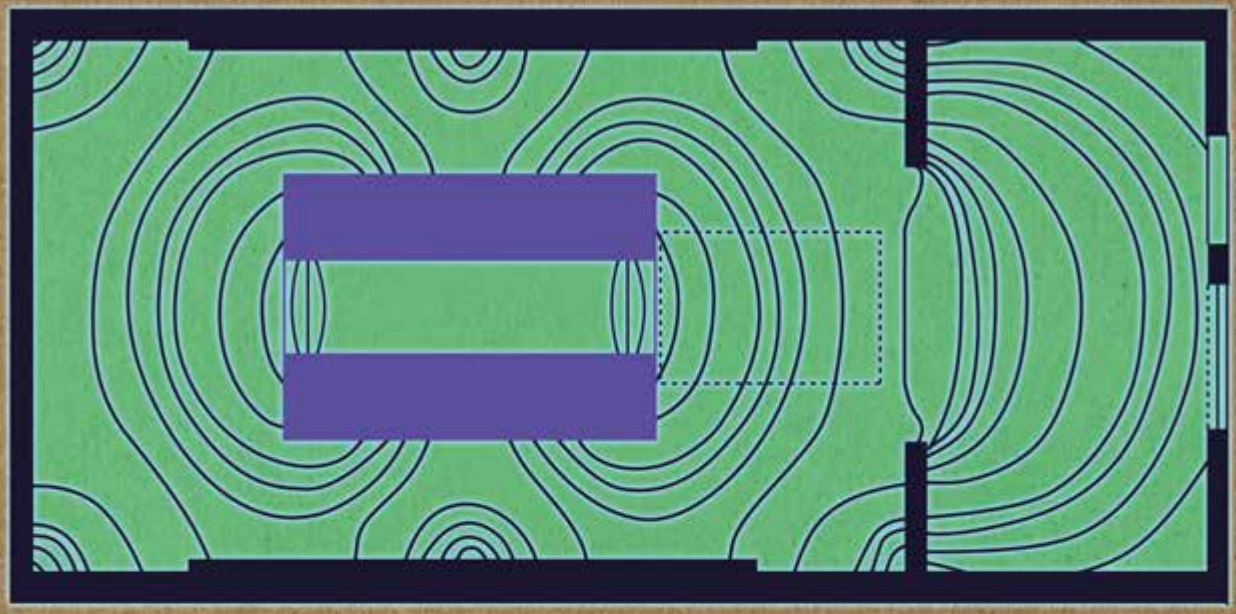
PAUL LAUTERBUR et PETER MANSFIELD
1929–2007 et 1933–

Scientifiques américain et britannique qui se sont partagé le prix Nobel de physiologie ou de médecine en 2003 pour leurs recherches ayant mené à la mise au point de l'IRM.

TEXTE EN 30 SECONDES

Sharon Ann Holgate

Les appareils d'IRM construisent une série d'images de coupes transversales à partir du rayonnement électromagnétique émis quand des ondes radio et de puissants champs magnétiques changent les spins des protons.



LES JONCTIONS DE JOSEPHSON

Théorie en 30 secondes

En 1962, Brian Josephson a prédit que les paires de Cooper devraient normalement pouvoir aussi pénétrer par effet tunnel une barrière isolante ou non supraconductrice entre deux supraconducteurs. Les électrons sont capables de sauter par-dessus un petit vide (couche isolante entre deux conducteurs), un effet connu sous le nom d'effet tunnel. Mais contrairement aux électrons qui utilisent l'effet tunnel pour passer d'un conducteur à l'autre à température ambiante, les paires de Cooper n'ont pas besoin d'un champ électrique pour les amener en douceur à travers l'obstacle. Toutes les paires de Cooper dans un supraconducteur partagent une fonction d'onde commune, et la différence de phase de la fonction d'onde, de chaque côté de la barrière isolante, fait que les paires de Cooper pénètrent spontanément par effet tunnel à travers la barrière. Cependant, si un voltage est appliqué sur la jonction, le courant Josephson est remplacé par un courant oscillant d'une très haute fréquence. La fréquence dépend du voltage appliqué. Puisqu'on mesure les fréquences avec plus de précision que les voltages, les jonctions de Josephson sont utilisées comme voltmètres de haute précision. Si une jonction de Josephson fait partie d'un circuit fermé, le voltage appliqué à la jonction change, même avec des champs magnétiques extrêmement faibles. On appelle SQUID ces dispositifs supraconducteurs à interférence quantique.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

L'apparition inattendue d'un courant supraconducteur quand deux supraconducteurs sont séparés par un petit vide est prometteuse ; on y trouvera certainement de nombreuses applications.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Les jonctions de Josephson fonctionnant comme des portes logiques très rapides, les chercheurs étudient leur utilisation dans des ordinateurs ultrarapides. Une des propriétés quantiques des jonctions de Josephson est que dans une boucle supraconductrice, elles peuvent amener la superposition de deux courants de Josephson simultanément dans des directions opposées. Les chercheurs étudient comment de toutes petites boucles supraconductrices pourraient être reliées pour stocker des données quantiques ou pour assembler un ordinateur quantique.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'EFFET TUNNEL
page 80

LES BITS QUANTIQUES (QUBITS)
page 106

L'INFORMATIQUE QUANTIQUE
page 108

LES SUPRACONDUCTEURS
page 140

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

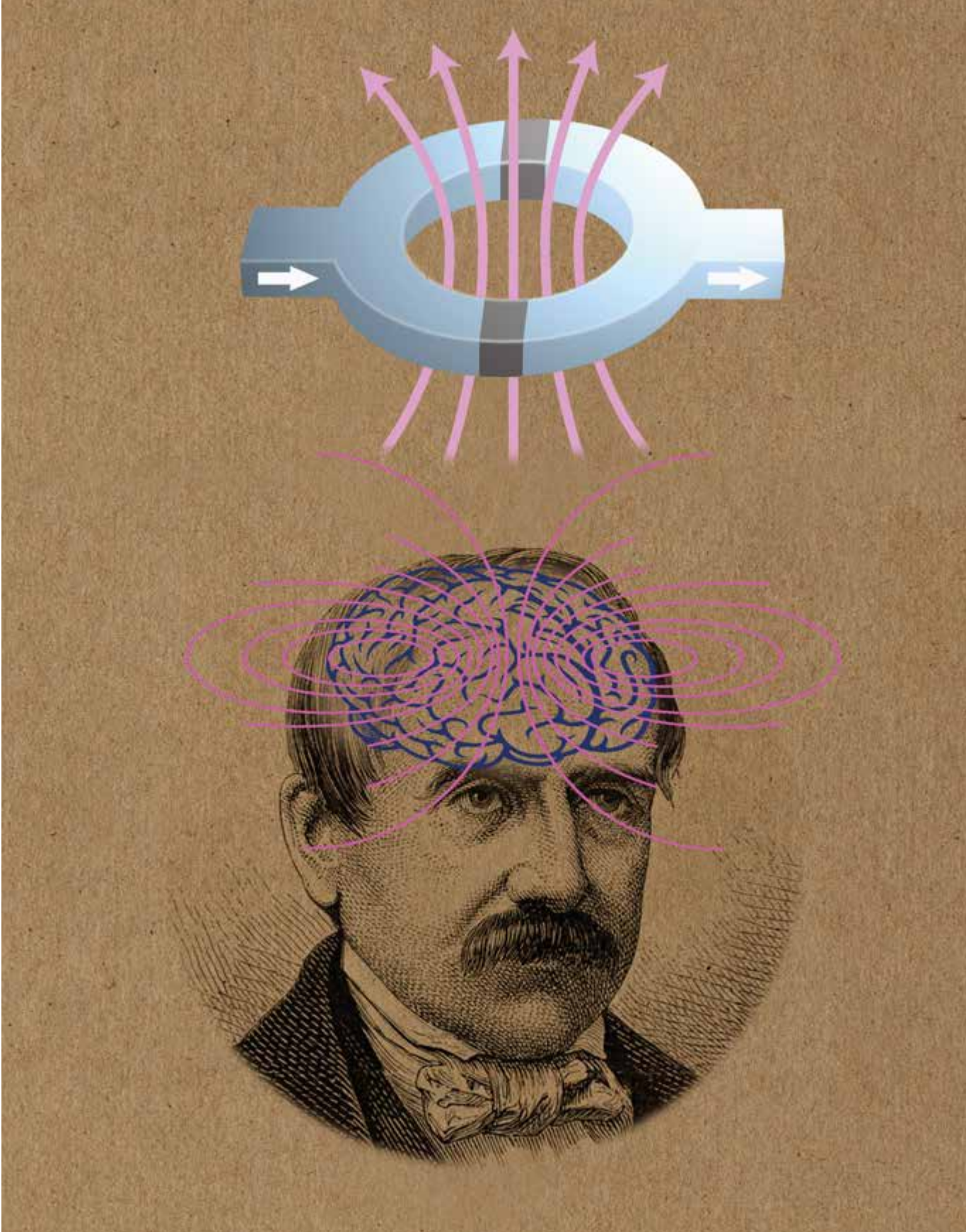
LEO ESAKI et IVAR GIAEVER
1925– et 1929–

Physiciens japonais et norvégien qui ont partagé avec Brian Josephson le prix Nobel de physique de 1973 pour leurs travaux sur l'effet tunnel.

TEXTE EN 30 SECONDES

Alexander Hellemans

Un dispositif supraconducteur à interférence quantique (SQUID) peut détecter de faibles variations des champs magnétiques, y compris ceux du cerveau.



Janvier 1940
Naît à Cardiff, au pays de Galles.

1960
Obtient un baccalauréat en sciences naturelles de l'Université de Cambridge.

1962
Publie dans la revue *Physics Letter* un article sur ce que l'on allait bientôt appeler « l'effet Josephson ».

1964
Obtient un doctorat de Cambridge.

1964
Invention du dispositif supraconducteur à interférence quantique (SQUID), magnétomètre des plus sensibles utilisant les jonctions de Josephson.

1965
Accepte un travail temporaire comme assistant de recherche à l'Université de l'Illinois.

1967
Retourne à Cambridge en tant que Directeur adjoint de recherche.

1972
Devient lecteur (conférencier principal) de physique à Cambridge.

1973
Partage le prix Nobel de physique avec Leo Esaki et Ivar Giaever.

1974
Devient professeur de physique à Cambridge.

1983
Est invité par le *Congressional Comittee* des États-Unis à préciser la question des « états supérieurs de conscience ».

1988
Met en place le *Mind-Matter Unification Project* (*projet d'unification de l'esprit-matière*) à Cambridge.

2007
Prend sa retraite de Cambridge mais poursuit ses recherches.

BRIAN JOSEPHSON

Comme beaucoup de grands physiciens, Brian Josephson a très tôt fait preuve d'une connaissance intuitive élevée de son sujet. Lorsqu'il étudiait au premier cycle, il impressionnait régulièrement ses professeurs avec la profondeur de sa pensée ; quand il a décroché son premier diplôme, à l'âge de 20 ans, il avait déjà publié quelques articles. Décidant de rester à Cambridge, il y a terminé un doctorat dans la branche de la physique qui l'intriguait le plus, soit le phénomène de la supraconductivité, qui se manifeste à des températures extrêmement basses. Il était toujours étudiant au doctorat quand il a publié son article le plus célèbre : *Possible New Effects in Superconductive Tunnelling*. La théorie quantique acceptait que des particules puissent se frayer un passage à travers des barrières par ailleurs impénétrables, mais Josephson a montré comment cela pouvait provoquer un effet jusque-là inconnu (puisque surnommé effet Josephson) dans le contexte des supraconducteurs. Ce fut l'un des premiers exemples d'un effet quantique pouvant être exploité à des échelles macroscopiques, et il a conduit à une technologie de nos jours courante : la jonction de Josephson.

Josephson n'avait que 33 ans quand il a partagé le prix Nobel de physique avec deux autres chercheurs qui avaient travaillé sur l'effet tunnel. Bien que leur cadet, il a reçu la moitié du prix, et ses deux collègues un quart chacun. Ce n'est que l'année suivante, en 1974, que Josephson fut nommé professeur à Cambridge, un poste qu'il a occupé jusqu'à sa retraite, en 2007.

Vers la fin des années 1970, Josephson a peu à peu perdu ses illusions sur la physique traditionnelle. Il avait le sentiment qu'elle négligeait de vastes secteurs de l'expérience qui, avec un peu de chance, pourraient être mis en lumière par la théorie quantique ou l'un de ses développements à venir. Il a commencé à s'intéresser aux philosophies orientales, à la méditation et aux niveaux supérieurs de conscience et, en 1988 – toujours sous l'égide du département de physique de Cambridge – il a établi les bases de son *projet d'unification de l'esprit-matière*. Il s'intéressait au langage, à la musique et aux processus de cognition, certes des sujets de réflexion très honorables dans d'autres départements, mais qui ne relevaient qu'accessoirement de la physique théorique.

Plus récemment, Josephson a écrit sur des sujets typiquement non scientifiques, comme la télépathie et l'homéopathie, ce qui l'a inévitablement amené à s'opposer à ses pairs plus conservateurs. Josephson demeure personnellement ouvert à ce qu'il appelle « les sciences hérétiques ». Sur son site Web, il arbore la devise de la Royal Society, *Nullius in verba*, qu'il a ainsi traduite : « ne croyez personne sur parole ».

LES POINTS QUANTIQUES

Théorie en 30 secondes

Parmi les facteurs limitant la miniaturisation des structures sur les puces électroniques, on compte les effets quantiques qui interfèrent avec le fonctionnement des circuits. Quand des conducteurs se rapprochent trop, les électrons se transmettent de l'un à l'autre par effet tunnel. Mais les chercheurs tâchent de tourner ces effets quantiques à leur avantage. Les points quantiques sont d'infimes nanoparticules faites de matériaux semi-conducteurs. Leur mission : se faire si petits que les effets quantiques deviennent visibles. D'une taille moyenne de 10 à 50 atomes (de 2 à 10 nanomètres), ils commencent à se comporter eux-mêmes comme des atomes. Les électrons à l'intérieur des bandes de conduction commencent à peupler les niveaux quantiques discrets imposés par le principe d'exclusion de Pauli. C'est pourquoi les points quantiques sont parfois appelés « atomes artificiels ». Comme les nanopoints sont faits de matériaux semi-conducteurs, il y a un vide entre la bande de conduction et la bande la plus haute. Les photons peuvent exciter les électrons dans la bande de valence et les faire rebondir jusque dans la bande de conduction ; ces électrons peuvent retourner, toujours par bonds, vers la bande de valence en émettant un photon. À ce moment, la différence d'énergie entre la bande de conduction et la bande de valence peut être calibrée en changeant la taille des nanoparticules, là où la différence d'énergie est la plus élevée pour les plus petites particules.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Les points quantiques sont des nanoparticules souvent attachées à un substrat ou une surface active et qui, vu leur petite taille, acquièrent des propriétés quantiques potentiellement intéressantes d'un point de vue technologique.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Les points quantiques ont la capacité d'éjecter deux électrons simultanément quand ils sont frappés par un seul photon ; ils pourraient donc augmenter le rendement des cellules solaires. Ils peuvent être calibrés pour produire n'importe quelle couleur du spectre, c'est pourquoi les chercheurs veulent maintenant savoir comment les utiliser dans les affichages et les diodes électroluminescentes.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LE PRINCIPE D'EXCLUSION DE PAULI
page 58

L'INFORMATIQUE QUANTIQUE
page 108

LE TRANSISTOR
page 120

BIOGRAPHIE EN 3 SECONDES

WOLFGANG PAULI
1900–1958
Physicien théoricien autrichien qui a inventé le principe d'exclusion qui porte son nom.

TEXTE EN 30 SECONDES

Alexander Hellemans

Les points quantiques pourraient être utilisés pour produire des affichages d'une précision inégalée.

L'OPTIQUE QUANTIQUE

Théorie en 30 secondes

Tous les appareils optiques fonctionnent au niveau quantique, et l'interaction entre les photons de lumière et les atomes des objets, miroirs et lentilles s'expliquent par l'électrodynamique quantique (QED). Tout récemment, les applications directes de la théorie quantique se sont multipliées en optique, domaine aussi appelé « photonique ». Parmi les plus spectaculaires avancées se trouvent les lentilles quantiques, des matériaux qui manipulent les photons d'une manière différente que les lentilles classiques. Prenons les métamatériaux. Ces substances ont des structures complexes qui produisent d'étranges effets, comme un indice de réfraction négatif qui impose à la lumière une courbe inverse à celle que produisent les lentilles et les prismes classiques. Les structures des métamatériaux permettent la mise au point sur des objets beaucoup plus petits qu'avec une lentille classique, ce qui en fait des super-lentilles. Un autre exemple de structure optique quantique est le treillis photonique, qui agit sur la lumière à la façon d'un semi-conducteur sur des électrons. L'irisation des ailes de certains papillons est produite par des treillis photoniques naturels. Les treillis photoniques pourraient être utilisés dans les futurs ordinateurs optiques, et les cristaux de ces treillis le sont déjà dans des agencements de peintures spéciales, dans les revêtements antireflets des lentilles, ainsi que dans les fibres optiques photoniques de haute résolution.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Des matériaux optiques quantiques spéciaux comme les métamatériaux et les treillis photoniques manipulent les photons d'une manière que l'optique classique ne peut pas reproduire.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

À cause de leur indice de réfraction négatif, les métamatériaux peuvent incurver la lumière autour d'un objet, le faisant ainsi disparaître. On a déjà réalisé l'expérience mais elle demeure limitée, les matériaux utilisés absorbant trop de lumière pour créer une invisibilité totale. Il existe d'autres mécanismes qui amplifient, optiquement parlant, le produit diminué du métamatériau ou qui utilisent un cristal photonique pour contrôler la diffraction de la lumière. Prochainement, il se pourrait que l'on ait accès à des capes d'invisibilité semblables à celle de Harry Potter.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE (QED)
page 66

LES DIAGRAMMES DE FEYNMAN
page 70

LES DIVISEURS DE FAISCEAU
page 78

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

VICTOR VESELAGO
1929–

Physicien russe qui a été le premier à s'intéresser à l'indice de réfraction négatif et aux métamatériaux.

JOHN PENDRY
1943–

Physicien théoricien dont les travaux ont porté sur les théories des métamatériaux visant la mise au point de lentilles parfaites et de capes d'invisibilité.

ULF LEONHARDT
1965–

Physicien allemand qui travaille à des applications concrètes de la cape d'invisibilité.

TEXTE EN 30 SECONDES

Brian Clegg

Les treillis photoniques, comme les ailes irisées du papillon, manipulent la lumière en jouant de leur structure complexe.

EXTRÊMES QUANTIQUES

EXTRÊMES QUANTIQUES
GLOSSAIRE

antiquarks Équivalents, dans l'antimatière, des quarks fondamentaux qui composent neutrons et photons, et dès lors le cœur de la matière. Chaque quark a un antiquark qui lui est identique, sauf pour sa charge contraire et sa « couleur » (propriété supplémentaire des quarks).

boson Particule conforme à la statistique de Bose-Einstein (par opposition au fermion). D'habitude, les bosons sont des particules porteuses d'énergie, comme les photons et le célèbre boson de Higgs, mais le terme s'applique également aux noyaux atomiques comportant un nombre pair de particules. Contrairement au fermion, plusieurs bosons peuvent être dans un même état au même moment.

boule de glu Particule hypothétique composée uniquement de gluons.

chaleur massique La somme d'énergie calorique nécessaire pour produire un changement fixe de température dans une masse donnée d'une substance.

CERN Organisation installée à Genève, à la frontière franco-suisse, et qui abrite le Grand collisionneur de hadrons (LHC). Le CERN mène un vaste éventail d'expériences sur les particules ainsi que des recherches importantes sur l'antimatière.

effet Casimir Effet quantique causant une attraction entre deux plaques parallèles très proches l'une de l'autre, ce qui s'explique par les limites imposées par la brèche très étroite au moment de la formation de particules virtuelles, le tout étant comparé à ce qui se passe à l'extérieur des plaques (la pression venant de l'extérieur) ou sur le plan de limites imposées à l'énergie au zéro absolu, soit l'énergie d'un espace vide.

effet Meissner Expulsion de tout champ magnétique par un supraconducteur (une de ses propriétés caractéristiques), de telle sorte qu'au-dessus d'un supraconducteur, un aimant sera en état de lévitation.

espace-temps La relativité considère le temps comme une quatrième dimension. En relativité, il n'existe ni position absolue ni temps absolu, parce que la façon dont les choses se déplacent influence leur position dans le temps. Il importe donc de considérer l'espace-temps comme un tout plutôt que de voir l'espace et le temps comme deux entités indépendantes.

état noir État dans lequel un atome ne peut ni absorber ni émettre un photon, ce qui peut provoquer l'apparition de sortes de condensats de Bose-Einstein (voir page 144), qui « emprisonnent » la lumière.

gluon Boson élémentaire porteur des forces considérables qui lient les quarks, un peu comme les photons porteurs de l'énergie électromagnétique entre des particules chargées. Contrairement aux photons, qui n'ont pas de charge électrique, les gluons ont des « couleurs » différentes, type de charge supplémentaire associée aux quarks.

graviton Particule hypothétique qui, dans une théorie quantique de la gravité, serait porteuse de la force gravitationnelle, tout comme le photon est porteur de l'énergie électromagnétique.

liberté asymptotique Comportement inhabituel des puissantes forces observées entre les quarks, qui s'affaiblissent à mesure que les particules se rapprochent, et se renforcent à mesure qu'elles s'éloignent. En d'autres termes : on n'a jamais vu un quark seul.

point lambda Température sous laquelle l'hélium passe de l'état de fluide normal à l'état de superfluide.

quark Particule fondamentale des neutrons et des protons, et donc du cœur de la matière. Il existe six types de quark : haut, bas, étrange, charmant, beauté et sommet (ces appellations n'ont pas de réel sens). Les neutrons et les protons sont différentes combinaisons de trois quarks haut et bas ; d'autres particules sont constituées de paires de quarks.

singularité Point dans l'espace-temps où une propriété devient infinie (le plus souvent appliquée au trou noir, où le champ gravitationnel devient infini) et où les théories actuelles perdent tout leur sens. Le cœur d'un trou noir est une singularité.

supraconductivité Capacité qu'ont les matériaux extrêmement froids de laisser passer librement (sans résistance) de l'électricité et d'expulser un champ électromagnétique (voir page 140).

trou noir Endroit où la matière est devenue si compacte qu'elle s'affaisse à un point inférieur à la force gravitationnelle. Un trou noir est le plus souvent formé à la suite de l'affaissement d'une étoile gigantesque. Sa taille apparente est appelée « horizon des événements » et correspond à la distance du centre d'où rien, pas même la lumière, ne peut s'échapper. Le trou noir lui-même est une singularité, un point sans dimension.

zéro absolu Plus basse température concevable, où les atomes d'un matériau sont dans leur état énergétique minimal. Concrètement inatteignable dans un nombre fini d'étapes. Sa valeur : -273,15 °C (0 K).

L'ÉNERGIE AU ZÉRO ABSOLU

Théorie en 30 secondes

Le rapport temps-énergie formulé par le principe d'indétermination d'Heisenberg permet à d'importantes fluctuations d'énergie d'exister pendant une courte durée. Une des conséquences de ce phénomène est que chaque système quantique possède un état d'énergie minimum – appelé énergie au zéro absolu – sous lequel on ne peut aller. Même les champs quantiques omniprésents dans un espace vide ont une énergie au zéro absolu. Un vide spatial n'est donc jamais vraiment vide ! On peut l'imaginer comme une mer, jamais la même, de particules virtuelles oscillant de l'existence au néant. Personne ne sait vraiment combien il y a d'énergie dans ce vide. Certaines théories prédisent une énergie immense, mais il se trouve que des observations faites sur les grandes structures de l'univers suggèrent des valeurs beaucoup plus petites. En dépit des questions posées sur sa magnitude, des expériences fascinantes ont prouvé qu'il existe bel et bien une énergie au zéro absolu du vide. L'exemple souvent cité, l'effet Casimir, met en évidence une force d'attraction entre deux plaques métalliques placées l'une près de l'autre. Ce phénomène, prédit par Hendrik Casimir en 1948, a été confirmé en laboratoire. Mais l'effet Casimir prouve-t-il l'existence de l'énergie au zéro absolu ? Casimir le pensait, mais il existe d'autres explications. Le jury délibère donc toujours.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Grâce au principe d'indétermination d'Heisenberg, nous savons que le vide n'existe pas dans l'espace. Même le vide est une masse en ébullition de particules virtuelles.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Les problèmes énergétiques de la planète peuvent-ils être résolus en extrayant du vide une énergie au zéro absolu ? La plupart des physiciens diraient que c'est impossible : comment pouvez-vous extraire de l'énergie de ce qui, par définition, est un état d'énergie minimale ? Mais en 1984, Robert L. Forward a proposé une expérience de pensée s'appuyant sur l'effet Casimir qui montrait comment pourrait fonctionner une « pile de fluctuations du vide » (même si, en pratique, le système se trouverait à dépenser plus d'énergie qu'il n'en crée).

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LE PRINCIPE D'INDÉTERMINATION D'HEISENBERG
page 48

LA THÉORIE DES CHAMPS QUANTIFIÉS
page 64

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

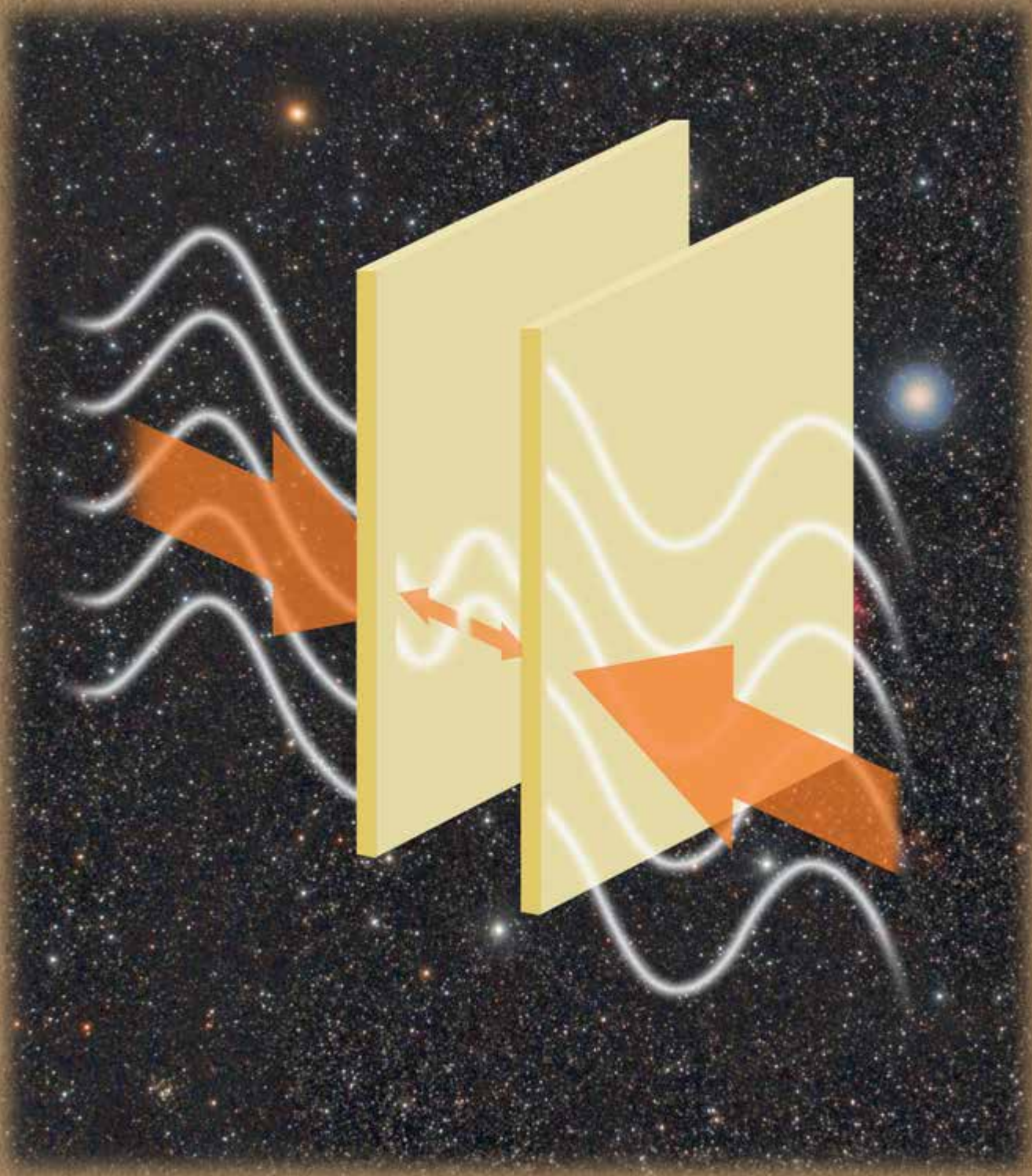
HENDRIK CASIMIR
1909–2000
Physicien hollandais qui a travaillé pour Niels Bohr et Wolfgang Pauli.

ROBERT L. FORWARD
1932–2002
Physicien américain, ingénieur aérospatial et écrivain de science-fiction.

TEXTE EN 30 SECONDES

Andrew May

Dans l'effet Casimir, deux plaques métalliques très proches l'une de l'autre, placées dans le vide, sont attirées l'une vers l'autre.



LES SUPRACONDUCTEURS

Théorie en 30 secondes

En 1911, le physicien hollandais Heike Kamerlingh Onnes a testé les propriétés du mercure à basse température. À sa grande stupéfaction, à 4,2 K (-268,95 °C), sa résistance électrique s'est purement et simplement envolée ! Si l'on passait un courant dans un tel supraconducteur, il s'écoulerait sans interruption aussi longtemps que le matériau serait suffisamment froid. L'explication a été fournie en 1950 par les physiciens américains John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer. Ils ont découvert qu'à de basses températures, les électrons forment des paires de Cooper, c'est-à-dire des jumeaux qui se lient l'un à l'autre pour former un boson. Ce genre de particules, comme les photons, peuvent se rassembler dans un même état, alors que les fermions, comme tout électron normal, ne peuvent avoir qu'une seule particule dans le même lieu et le même état. À de très basses températures, il se forme un « condensat », un amas de paires de Cooper agissant comme une entité unique. Au lieu d'électrons individuels traversant le conducteur, on a une substance unique à laquelle les atomes du matériau n'opposent aucune résistance. C'est la supraconductivité qui explique les aimants extraordinairement puissants des appareils d'IRM et des accélérateurs de particules comme le Grand collisionneur de hadrons. Elle est aussi à l'origine de l'effet Meissner.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Un changement de comportement quantique de l'électron à de très basses températures produit un courant qui circule librement, utilisé dans la production d'électro-aimants extrêmement puissants.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Le mécanisme des paires de Cooper s'enclenche seulement à de très basses températures, et l'on a cru que cette limite empêcherait les supraconducteurs de fonctionner au-dessus de 30 K (-243,15 °C), mais l'invention, dans les années 1980, de supraconducteurs « à haute température » pouvant aller jusqu'à 135 K (-138,15 °C), laisse espérer un supraconducteur fonctionnant à température ambiante. On ne sait toujours pas jusqu'à quelles températures peuvent fonctionner les supraconducteurs, mais on croit que l'effet est lié au spin de l'électron.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LES JONCTIONS DE JOSEPHSON
page 126

LES SUPERFLUIDES
page 142

LE CONDENSAT DE BOSE-EINSTEIN
page 144

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

HEIKE KAMERLINGH ONNES
1853–1926

Physicien hollandais qui fut le premier à liquéfier l'hydrogène et à observer la supraconductivité. Il a remporté le prix Nobel de physique en 1913 pour ses travaux sur la matière à de basses températures.

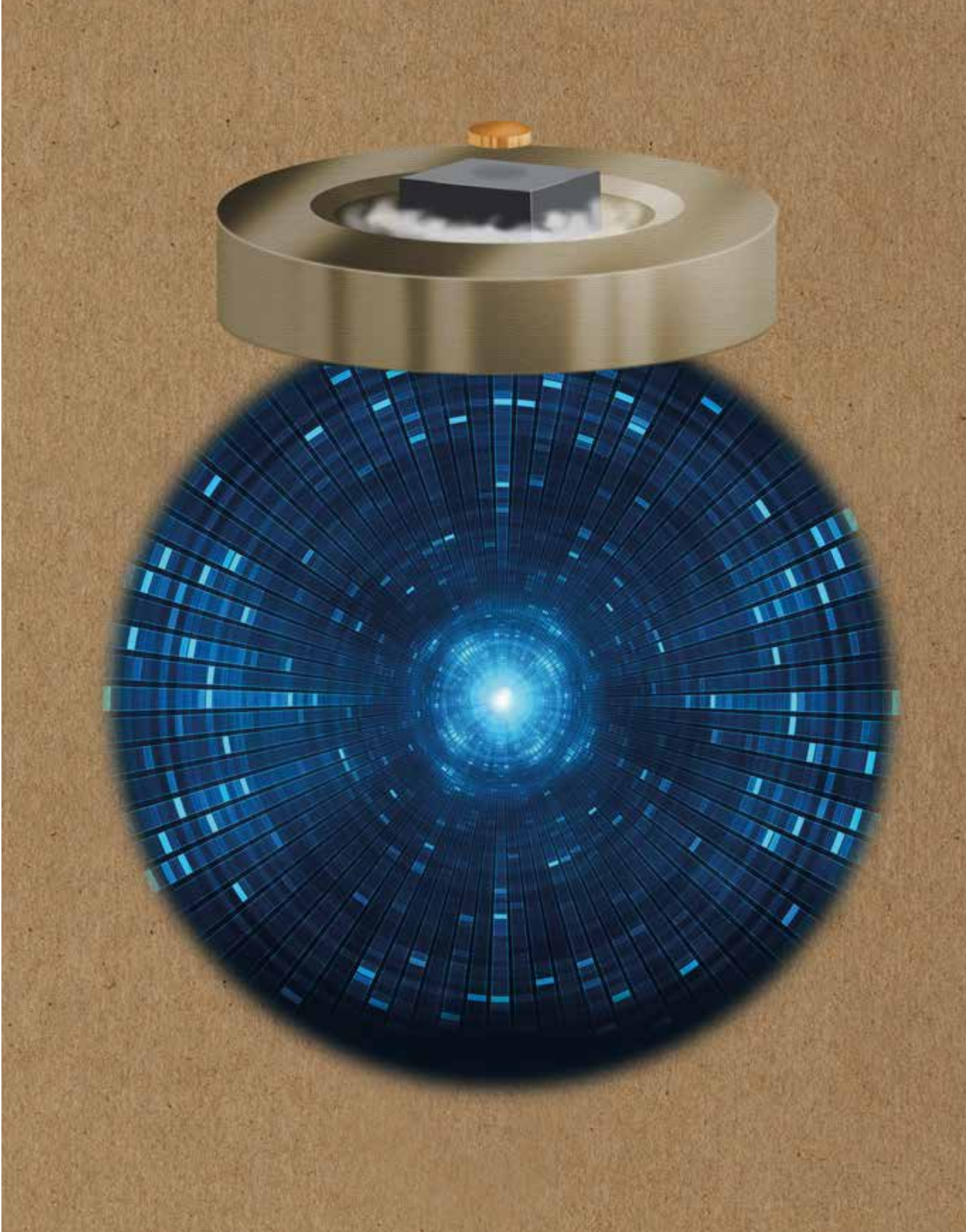
JOHN BARDEEN, LEON N. COOPER et JOHN R. SCHRIEFFER
1908–1991, 1930– et 1931–

Physiciens américains qui se sont partagé le prix Nobel de physique de 1972 pour leurs travaux sur la théorie de la supraconductivité.

TEXTE EN 30 SECONDES

Brian Clegg

Les aimants supraconducteurs produisent une lévitation et servent à créer de puissants champs magnétiques pour les accélérateurs.



LES SUPERFLUIDES

Théorie en 30 secondes

Heike Kamerlingh Onnes a été le premier physicien à liquéfier l'hélium. En 1911, il a établi qu'en dessous de 2,17 K (-270,98 °C), la conduction de la chaleur produite par l'hélium liquide va en augmentant. On a appelé cette température « point lambda » à cause de la forme que prend la courbe de la conductivité de la chaleur en fonction de la température. Le phénomène est demeuré un mystère jusqu'en 1938, quand Pyotr Kapitsa, John Allen et Don Misener ont découvert qu'à une température inférieure au point lambda, la viscosité de l'hélium disparaît complètement. L'explication du phénomène a beaucoup à voir avec ce qui cause la supraconduction dans les métaux. Dans certains supraconducteurs, les électrons, qui sont des bosons, s'accouplent et perdent toute résistance électrique. Les atomes de l'hélium-4 forment un condensat de Bose-Einstein grâce auquel tous les atomes partagent une même fonction d'onde et perdent toute friction mécanique. L'hélium-3, qui est constitué de fermions, respecte le principe d'exclusion de Pauli et ne peut donc pas former de condensat de Bose-Einstein. Pourtant, il peut lui aussi devenir un superfluide si on le refroidit à 0,002° au-dessus du zéro absolu (-273,15 °C). Dans ce cas, l'explication est un mécanisme plus proche de celui qui provoque la supraconductivité. Les atomes de l'hélium-3 s'accouplent en alignant leur aimantation, formant alors des paires qui sont des bosons.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

La superfluidité est le seul effet quantique observable à l'œil nu ; un superfluide remué va poursuivre éternellement sa rotation.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

L'hélium superfluide est un vrai Houdini. À cause de l'absence totale de friction, il peut déborder du bord du verre qui le contient et passer par les trous les plus infimes (quelques atomes de diamètre à peine). L'hélium superfluide a été utilisé la première fois pour le refroidissement du miroir d'un télescope dans l'espace à l'aide de l'Infrared Astronomical Satellite (satellite astronomique infrarouge), opérationnel en 1983. La diffusion de l'hélium à travers deux prises de cuivre avait alors maintenu la température à 1.6 K (-271,55 °C).

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LES SUPRACONDUCTEURS
page 140

LE CONDENSAT
DE BOSE-EINSTEIN
page 144

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

HEIKE KAMERLINGH ONNES
1853 –1926

Physicien hollandais et inventeur de techniques de réfrigération qui a étudié le comportement de la matière à de très basses températures.

PYOTR KAPITSA
1894–1984

Physicien russe qui a reçu en 1978 le prix Nobel de physique pour sa découverte de la superfluidité. Les travaux parallèles des physiciens canadiens John Allen et Don Misener ne leur ont pas valu une part du prix.

TEXTE EN 30 SECONDES

Alexander Hellemans

Un superfluide n'a pas de viscosité ; une fois mis en rotation, il tournoiera à l'infini.

LE CONDENSAT DE BOSE-EINSTEIN

Théorie en 30 secondes

On sait qu'il existe trois états de la matière – solide, liquide, gazeux –, et il se peut que vous ayez entendu parler du quatrième état qu'est le plasma, une sorte de gaz composé d'ions chargés. Mais la physique en compte un cinquième, un état purement quantique : le condensat de Bose-Einstein. Cet état apparaît quand une série d'atomes appropriés est amenée près du zéro absolu (-273,15 °C). Ces atomes peuvent être soit des fermions (qui, à l'instar des électrons et des protons, doivent être dans des états uniques pour être près les uns des autres), soit des bosons (qui, comme les photons, peuvent avoir plusieurs particules identiques entassées les unes sur les autres). Un condensat de Bose-Einstein se compose de bosons, la plupart amenés à leur état énergétique minimal par un refroidissement extrême ; en groupe, ils commencent à se comporter comme une version à grande échelle d'une particule quantique. Il en résulte une superfluidité signifiant qu'un nombre important d'atomes peut être soumis à des processus quantiques généralement attribués aux particules isolées, comme l'interférence mécanique quantique produite par l'expérience de la double fente. À ce jour, on ne connaît pas d'applications du condensat de Bose-Einstein, mais on a émis l'hypothèse que l'on pourrait les utiliser pour détecter les avions furtifs, en calculant comment de légères modifications de la gravité peuvent influencer l'interférence quantique.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Le condensat de Bose-Einstein constitue le cinquième état de la matière, qui est produit en amenant un gaz de bosons à des températures extrêmement basses. Les bosons se comportent alors comme une particule quantique unique.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Des scientifiques ont utilisé le condensat de Bose-Einstein pour ralentir la lumière à une vitesse de marche. Deux lasers ont été envoyés à l'intérieur d'un condensat. Le premier laser produit une structure qui permet au deuxième de se forcer un passage, réduisant la vitesse de la lumière sous 1 mètre par seconde. On a graduellement réduit la puissance du premier laser à couplage, ce qui a eu pour effet de piéger le deuxième rayon dans un étrange mélange de matière et de lumière (un état noir). Il n'a été libéré que lorsque le laser couplant a été relancé.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA DOUBLE FENTE QUANTIQUE
page 32

LE PRINCIPE D'EXCLUSION DE PAULI
page 58

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

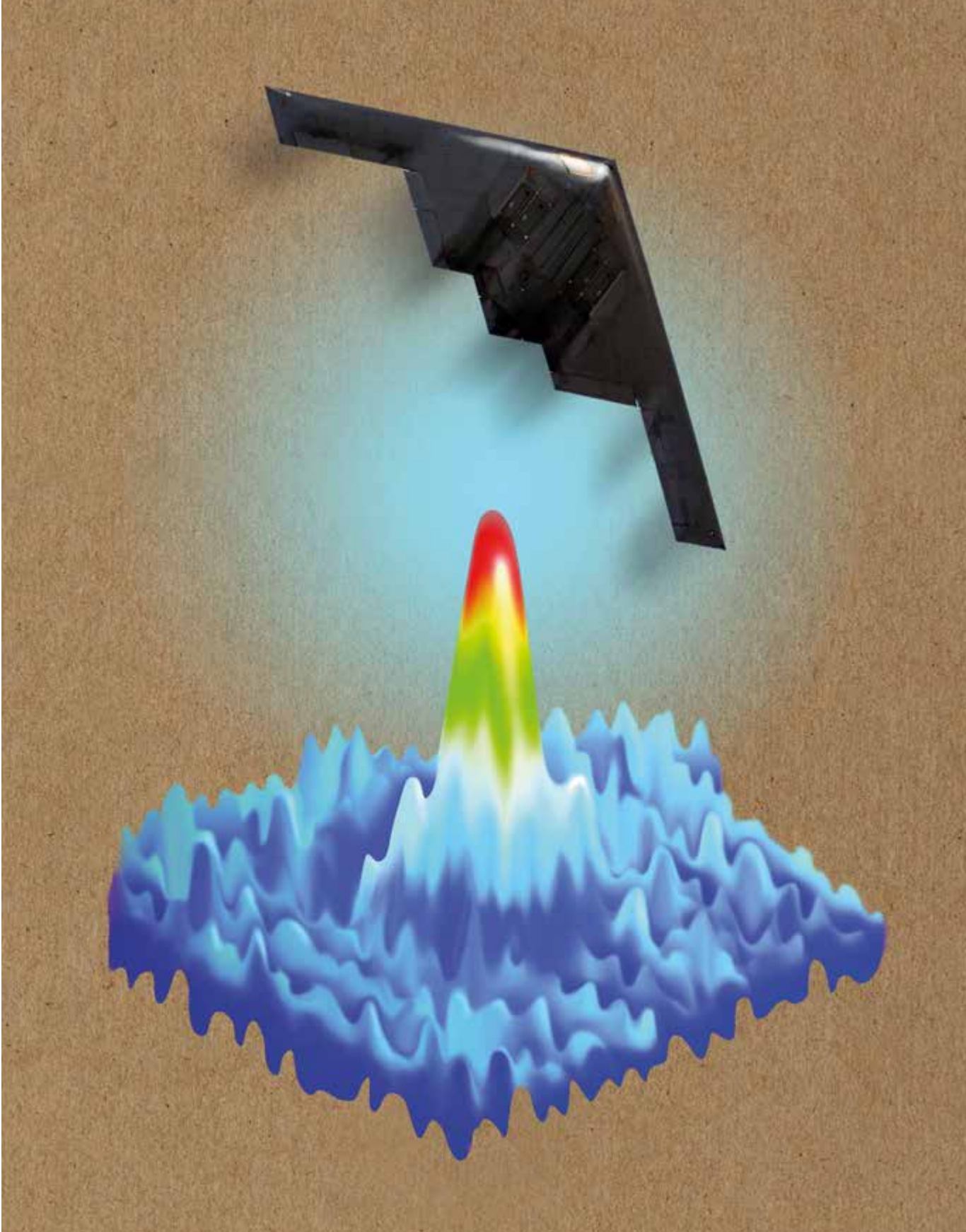
ALBERT EINSTEIN
1879–1955
Physicien allemand qui a reçu l'article de Bose sur sa théorie, l'a fait publier et en a étendu le contenu aux atomes.

LENE VESTERGAARD HAU
1959–
Physicien danois dont l'équipe de Harvard s'est servi d'un condensat de Bose-Einstein pour ralentir puis arrêter la lumière.

TEXTE EN 30 SECONDES

Brian Clegg

Les fonctions d'onde de condensats en interaction produisent des schémas d'interférence qui seraient influencés par des variations dans la gravité et capables de détecter le passage d'un avion furtif.



1er janvier 1894
Naît à Calcutta de Surendra Nath et de son épouse Amodini.

1913
Obtient un diplôme de l'Université de Calcutta.

1917
Entreprend une carrière d'enseignant à l'Université de Calcutta.

1919
Traduit vers l'anglais les écrits d'Albert Einstein sur la relativité.

1921
Devient lecteur en physique à l'Université de Dacca.

1924
Publie un article sur l'impossible distinction entre particules quantiques identiques.

1925
Voyage en Europe, où il travaille avec Marie Curie et rencontre Albert Einstein.

1926
Est nommé professeur et directeur du département de physique de l'Université de Dacca.

1945
Devient professeur de physique à l'Université de Calcutta et président de la Indian Physical Society.

1948
Met sur pied la Science Association of Bengal.

1954
Est élu à la chambre haute du Parlement. Le gouvernement indien lui décerne le titre Padma Vibushan, deuxième plus haute décoration civile du pays.

1958
Est élu Membre de la Société Royale.

4 février 1974
Meurt à Calcutta.

SATYENDRA NATH BOSE

Étudiant en physique et lauréat

en mathématiques, Satyendra Nath Bose était un esprit universel qui excellait aussi dans les langues. En 1919, et tout en donnant des cours de physique à l'Université de Calcutta, Bose et son collègue physicien Meghnad Saha ont réalisé la première traduction anglaise des articles révolutionnaires d'Albert Einstein. Cinq ans plus tard, alors qu'il était désormais rattaché à l'Université de Dacca, Bose y est allé de sa propre révolution. Il avait 30 ans.

En 1900, Max Planck avait émis l'idée que la chaleur se dégageant d'objets très chauds se présente sous forme de morceaux ou « quanta » d'énergie. Bien que cela ait expliqué la distribution de l'énergie à travers le spectre de ce rayonnement thermique, certains arguments mathématiques utilisés par Planck pour fonder sa théorie étaient peu convaincants. Bose a résolu le problème en articulant la loi de Planck d'une autre façon. Alors que Planck croyait que l'on pouvait distinguer les quanta les uns des autres, Bose a adopté le postulat inverse : on ne peut pas les distinguer. L'idée révolutionnaire de Bose, selon laquelle les particules quantiques identiques ne peuvent être distinguées les unes des autres, est devenue l'une des pierres angulaires de la théorie quantique.

En 1924, Bose a fait parvenir à Einstein son article *La loi de Planck et l'hypothèse quantique de la lumière*, qu'une revue scientifique britannique avait refusé de publier. Impressionné, Einstein a endossé le contenu de l'article puis l'a traduit en allemand. Il a bien sûr été publié dans la revue de physique *Zeitschrift für Physik*. Einstein l'a par la suite enrichi, et ce travail commun est devenu la statistique de Bose-Einstein. Les particules qui y obéissent ont été nommées bosons en hommage à la contribution révolutionnaire de Bose.

Einstein a aussi aidé Bose à obtenir un visa lui ouvrant les portes de l'Europe. Bose a travaillé à Paris avec Marie Curie, puis a fait la connaissance d'Einstein, ainsi que d'autres fondateurs de la théorie quantique – Bohr, Heisenberg et Schrödinger, notamment – à Berlin.

En dépit de son formidable intellect, Bose donnait l'impression qu'il était désorganisé. Il sautait d'un domaine à l'autre, et une photo le montre arborant un béret et un mouchoir de cou avec des vêtements traditionnels indiens. Bose était un adepte de poésie et de littérature, il jouait de l'*esraj* (un instrument à cordes indien) et était reconnu pour son extrême gentillesse, sa modestie et sa compassion. Pour aider l'Inde à concurrencer les meilleurs à l'échelle mondiale, il a fait campagne pour que les sciences soient enseignées dans les langues de son pays plutôt qu'en anglais, puis il fondé la Science Association of Bengal, qui publiait un mensuel scientifique.

Bose a placé la physique du 20e siècle sur de nouveaux rails. En 1995, on a produit le premier condensat de Bose-Einstein, soit un grand nombre d'atomes obéissant à la statistique de Bose-Einstein, refroidis juste au-dessus du zéro absolu et se comportant comme un seul atome géant.

LA CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE

Théorie en 30 secondes

L'impressionnante force nucléaire

agissant sur les protons et les neutrons a échappé à toute description théorique jusque vers 1970, où l'on a découvert une couche plus profonde de réalité : les protons et les neutrons sont faits de quarks. Les quarks ont une charge électrique et une autre forme de charge, appelée « couleur ». La couleur est à l'origine des forces qui amènent les quarks à s'agglutiner, et qui donnent d'abord les neutrons et les protons, puis les noyaux atomiques. La théorie quantique de la relativité qui traite des forces agissant entre les particules qui portent ou contiennent une charge de couleur est la chromodynamique quantique (QCD). Cette théorie ressemble à l'électrodynamique quantique (QED), qui décrit les interactions entre les particules électriquement chargées et la lumière. La lumière est elle-même composée de particules, les photons. Des cas analogues dans la QCD montrent une interaction entre des particules ayant une charge de couleur et des gluons. Mais tandis que les photons n'ont aucune charge électrique et se déplacent indépendamment les uns des autres, les gluons ont une charge de couleur et interagissent les uns avec les autres en groupes, ce qui amène les forces en jeu dans la QCD à se comporter différemment des forces électromagnétiques de QED. C'est le cas notamment des quarks, qui sont enfermés à jamais dans des particules comme les protons et qui ne peuvent exister isolément.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

La charge de couleur, qui ressemble à la charge électrique, est une caractéristique des quarks et des gluons.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

La QCD explique pourquoi l'énergie nucléaire entre neutrons et protons est très forte, alors que celle entre quarks et gluons, à de très courtes distances, est relativement faible. Elle aide les physiciens du CERN à analyser les collisions entre protons sur la base de leurs composants quarks et gluons, et elle a contribué à la découverte du boson de Higgs. La QCD implique que les boules de glu existent, mais comme elles sont dissimulées par des particules faites de quarks et d'antiquarks, il est difficile de les isoler.

THÉORIES LIÉES

Voir aussi

LA THÉORIE DES CHAMPS QUANTIFIÉS
page 64

L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE (QED)
page 66

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

DAVID GROSS, H. DAVID POLITZER et FRANK WILZCEK
1941–, 1949– et 1951–

Physiciens américains et co-récipiendaires du prix Nobel de physique de 2004 pour avoir découvert que la QCD est une théorie expliquant de manière crédible les interactions entre les quarks.

TEXTE EN 30 SECONDES

Frank Close

Les couleurs de la chromodynamique quantique ne sont pas des couleurs visibles, mais une propriété comparable à la charge électrique.

LA BIOLOGIE QUANTIQUE

Théorie en 30 secondes

Les effets quantiques auraient-ils un rôle à jouer en biologie ? Au premier coup d'œil, c'est improbable : les effets quantiques sont par définition fragiles et n'apparaissent que dans des conditions d'isolement total et à basse température, alors que la vie est chaude, humide et désordonnée. Mais un comportement quantique peut bien être décelé dans des systèmes biologiques, et on les étudie dans une nouvelle discipline : la biologie quantique. Plusieurs réactions biochimiques contrôlées par des enzymes impliquent le mouvement d'un atome d'hydrogène ionisé – un proton solitaire – allant d'une molécule à l'autre. Le proton est si léger qu'au lieu d'escalader une barrière d'énergie, il peut la pénétrer par effet tunnel. On ignore encore si pareil effet tunnel, en chimie des enzymes, est accidentel ou s'il résulte d'une sélection naturelle. Ce qui est plus frappant encore, c'est que lorsque les molécules collectrices de lumière impliquées dans une photosynthèse bactérienne sont mises en contact avec le soleil, l'énergie semble se répartir dans une superposition d'ondes quantiques qui se déplacent de manière cohérente vers la réaction chimique photosynthétique initiale, ce qui amplifie l'efficacité de ce transport d'énergie. Il se pourrait également que le compas magnétique biochimique qui aide certains oiseaux à naviguer à l'aide du champ magnétique terrestre dépende d'une intrication quantique d'électrons.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Les effets mécaniques quantiques comme l'effet tunnel, la superposition et l'intrication jouent un rôle dans certains processus biologiques comme la photosynthèse et l'orientation du vol des oiseaux.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Les physiciens Roger Penrose et Stuart Hameroff ont trouvé dans les années 1990 un rôle théorique et controversé pour les effets quantiques en biologie. Ils ont mis de l'avant l'idée que la conscience humaine vient de superpositions des états quantiques des fibres de protéines dans les neurones, appelées microtubes. La réduction de la fonction d'onde dans ces états permettrait au cerveau de réaliser une sorte de calcul quantique dévoilant les réponses à des questions indémontrables par les règles formelles de la logique.

THÉORIE LIÉE

Voir aussi
L'EFFET TUNNEL
page 80

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

GRAHAM FLEMING
1949–
Chimiste américain qui, en 2007, fut le premier à observer une cohérence quantique au sein du transfert d'énergie de la photosynthèse.

PAUL DAVIES
1946–
Physicien britannique dont l'intérêt pour la physique de la vie va de l'astrobiologie aux mécanismes du cancer en passant par les effets quantiques en biologie.

TEXTE EN 30 SECONDES

Philip Ball

Les effets quantiques pourraient être responsables de la capacité de certains oiseaux de naviguer à l'aide de champs magnétiques.

LA GRAVITÉ QUANTIQUE

Théorie en 30 secondes

L'un des plus gros défis de la physique actuelle est d'imaginer une théorie de la gravité quantique. À l'horizon : l'espoir de réunir les deux piliers de la physique moderne, soit la distorsion de l'espace dans la théorie de la pesanteur (relativité générale) d'Einstein, et la théorie quantique, qui décrit le royaume de l'atome, dans une grandiose « théorie de toute chose ». Une telle théorie aiderait à comprendre les premiers instants du big bang et ce qui arrive aux abords de la singularité qui est au cœur du trou noir. Imaginer pareille théorie n'est pas facile. Alors que les mathématiques de la théorie quantique voient le temps et l'espace comme l'arrière-plan impassible et immuable des événements, la relativité les conçoit plutôt comme… relatifs. Pire : pour tester n'importe quelle théorie de la gravité quantique, il faut envisager des énergies considérables et des distances énormes, actuellement hors de portée sur le plan expérimental. Certains physiciens tentent de nouvelles approches. La plus connue est la théorie des cordes, qui décrit les particules comme de minuscules boucles vibratoires d'énergie réparties dans un espace à 9 ou 10 dimensions. Autre possibilité : l'espace est doté d'une microstructure discrète de franges discrètes reliées par des nœuds, le tout étant appelé réseau de spin. Selon cette théorie de la gravitation quantique à boucles, ces nœuds peuvent s'entrelacer pour former des boucles contenant les particules élémentaires.

CONDENSÉ EN 3 SECONDES

Les théories de la gravité quantique essaient de fusionner la relativité générale – qui décrit la gravité comme une propriété géométrique de l'espace et du temps – et la physique quantique du royaume atomique.

RÉFLEXION EN 3 MINUTES

Plusieurs hypothèses sur la gravité quantique parlent de structures discrètes dans l'espace-temps, dont l'effet cumulatif sur des particules traversant de vastes distances dans l'univers pourrait être observé. Si la gravité peut être quantifiée, alors la découverte d'unités quantiques de gravité – les gravitons – constituerait une preuve suffisante. Mais la gravité est l'énergie fondamentale la plus faible dans la nature, donc la détection d'un graviton est une tâche titanesque qui nécessiterait un détecteur plus massif qu'un trou noir.

THÉORIE LIÉE

Voir aussi
LA THÉORIE DES CHAMPS QUANTIFIÉS
page 64

BIOGRAPHIES EN 3 SECONDES

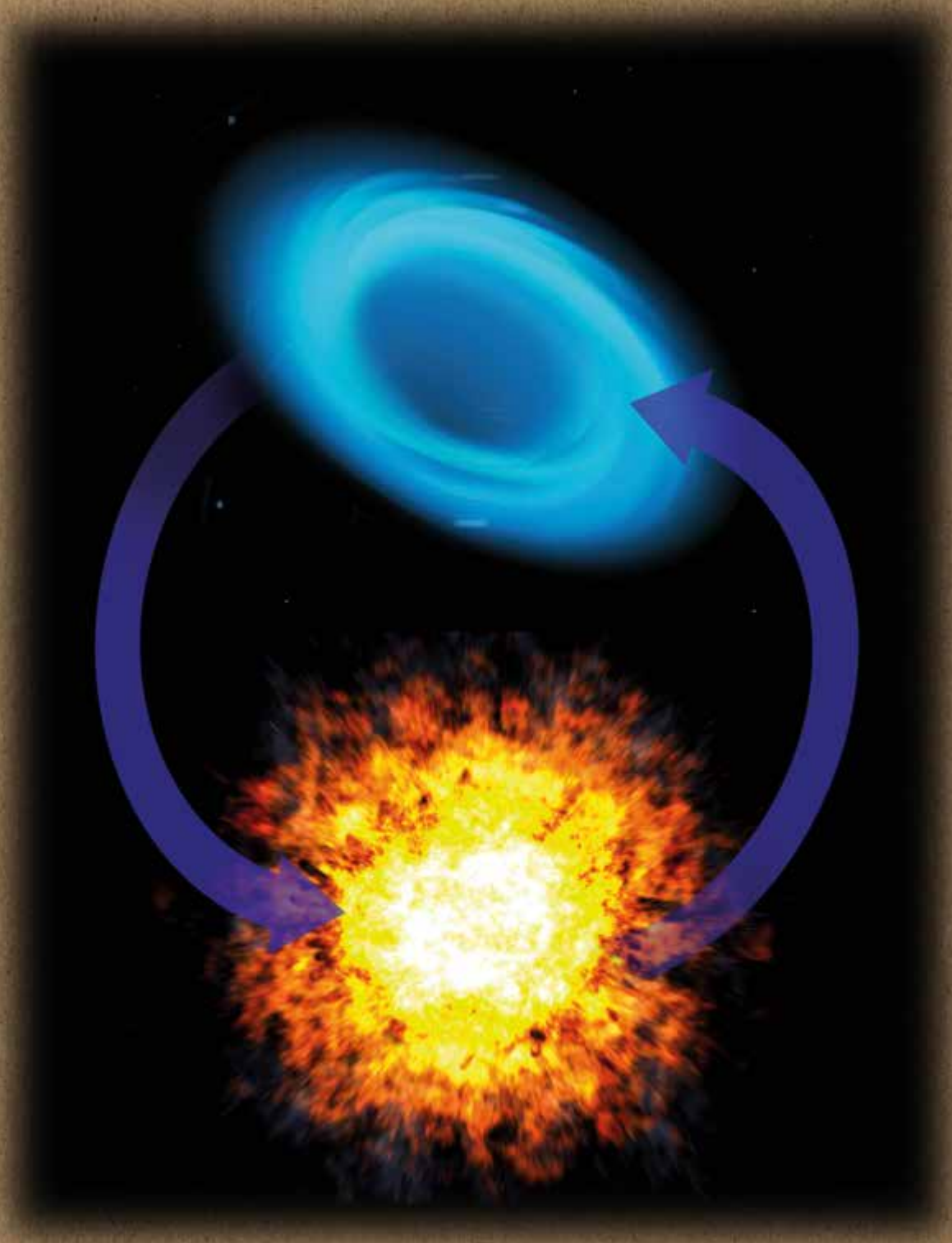
PAUL DIRAC
1902–1984
Physicien britannique qui, en 1932, fut le premier à tenter de quantifier la théorie de la relativité générale d'Einstein.

ABHAY ASHTEKAR
1949–
Physicien indien qui, en 1986, a réalisé une importante percée en reformulant la relativité générale pour rapprocher son langage mathématique de celui utilisé en physique quantique et des particules.

TEXTE EN 30 SECONDES

Sophie Hebden

On ne peut réellement comprendre le big bang et les trous noirs sans une théorie quantique de la gravité.



SOURCES

LIVRES

Paradox : The Nine Greatest Enigmas in Physics
Jim Al-Khalili
(Black Swan, 2013)

The Many Worlds of Hugh Everett III
Peter Byrne
(Oxford University Press, 2010)

Quantum Theory Cannot Hurt You
Marcus Chown
(Faber & Faber, 2008)

The God Effect : Quantum Entanglement
Brian Clegg
(St Martin's Griffin, 2009)

The Quantum Age
Brian Clegg
(Icon Books, 2014)

Antimatter
Frank Close
(Oxford University Press, 2010)

The Infinity Puzzle : Renormalisation and Quantum Theory
Frank Close
(Oxford University Press, 2011)

Nothing
Frank Close
(Oxford University Press, 2009)

The Quantum Universe
Brian Cox & Jeff Forshaw
(Allen Lane, 2011)

QED : The Strange Theory of Light and Matter
Richard Feynman
(Penguin, 1990)

Computing with Quantum Cats
John Gribbin
(Bantam, 2013)

Erwin Schödinger and the Quantum Revolution
John Gribbin
(Black Swan, 2013)

Beam : The Race to Make the Laser
Jeff Hecht
(Oxford University Press, 2010)

The Amazing Story of Quantum Mechanics
James Kakalios
(Duckworth, 2010)

Quantum
Manjit Kumar
(Icon Books, 2009)

ARTICLES ET SITES WEB

Biographie de Sir Peter Mansfield
www.nobel.prize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2003/mansfield-bio.html

The Higgs boson : One year on
Pauline Gagnon, physicienne des particules au CERN
Home.web.cern.ch/about/updates/2013/07/higgs-boson-one-year

Information au public sur le prix Nobel de physique 2001 pour la condensation Bose-Einstein
www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2001/popular.html

« Quantum Physics » *Institute of Physics*
www.quantumphysics.iop.org

Quantum life [vidéo]
Jim Al-Khalali
www.richannel.org/jim-al-khalali-quantum-life-how-physics-can-revolutionise-biology

Thème « Quantum World » *New Scientist*
www.newscientist.com/topic/quantum-world

Nouvelles relatives à la physique quantique
Science Daily
www.sciencedaily.com/news/matter_energy/quantum_physics

« Peston learns quantum physics » [vidéo]
Now Appearing
www.brianclegg.blogspot.co.uk/2013/08/peston-physics.html

« Why is quantum physics so important? »
Invigorate
invigorate.royalsociety.org/ks5/the-best-things-come-in-small-packages/why-is-quantum-physics-important.aspx

Scientific American
www.scientificamerican.com/topic/quantum-physics

S N Bose Projet
Falguni Sarkar, petit fils de Satyendra Nath Bose
www.snbose.org

À PROPOS DES COLLABORATEURS

Philip Ball est rédacteur pigiste et a été l'éditeur de *Nature* pendant plus de 20 ans. Il a étudié en chimie à l'Université d'Oxford et en physique à l'Université de Bristol, et il a signé plusieurs ouvrages dont *H2O : A Biography of Water, Bright Earth : Art and the Invention of Colour, The Music Instinct : How Music Works and Why We Can't do Without It et Curiosity : How Science Became Interested in Everything.* Son livre *Critical Mass : How One Thing Leads to Another* a remporté le prix Aventis du livre scientifique. On lui a décerné le prix Grady-Stack de vulgarisation de la chimie de l'American Chemical Society et il a été le premier récipiendaire du Prix Lagrange de communication des sciences avancées.

Brian Clegg est un écrivain scientifique. Après avoir œuvré dans le secteur des hautes technologies pour British Airways, puis travaillé avec le gourou de la créativité Edward de Bono, il a mis sur pied un nouveau type de cabinet-conseil dont les clients vont de la BBC au Met Office (service national britannique de météorologie). Il a écrit pour *Nature*, le *Times* et le *Wall Street Journal* et donné des cours aux universités d'Oxford et de Cambridge, ainsi qu'à la Royal Institution. Il édite sur le site www.popularscience.co.uk, des comptes rendus de livres et ses propres ouvrages (*A Brief History of Infinity et How to Build a Time Machine*).

Leon Clifford est écrivain et consultant. Sa spécialité : simplifier la complexité. Diplômé en physique et astrophysique, il est aussi membre de Association of British Science Writers. Il a travaillé plusieurs années comme journaliste dans les domaines scientifique, technologique et des affaires, et ses articles ont paru dans plusieurs publications, dont *Electronics Weekly, Wireless World, Computer Weekly, New Scientist* et le *Daily Telegraph*. Leon Clifford s'intéresse à tout ce qui a rapport à la physique, et particulièrement à la climatologie, à l'astrophysique et à la physique des particules.

Frank Close, membre de l'Ordre de l'Empire britannique, est professeur de physique à l'Université d'Oxford et chargé de cours au Collège Exeter, à Oxford. Il a déjà été directeur du département de physique théorique du Rutherford Appleton Laboratory et directeur des communications et de l'éducation du public au CERN. Ses recherches portent sur le quark et la structure « gluonique » des particules nucléaires, à propos desquels il a fait paraître plus de 200 articles d'abord évalués par des comités de lecture. Il est membre de l'American Physical Society et du British Institute of Physics, et on lui a décerné la médaille Kelvin en 1996 pour son extraordinaire contribution à la diffusion de la physique auprès du public. Il est l'auteur de plusieurs

ouvrages, dont *Neutrino* (sélectionné en vue de l'attribution du prix Galileo en 2013), le best-seller *Lucifer's Legacy : The Meaning of Asymmetry* et le récent *The Infinity Puzzle*.

Sophie Hebden est rédactrice scientifique pigiste. Elle vit à Mansfield, au Royaume-Uni, et arrive à écrire sur la physique tout en s'occupant de deux jeunes enfants. Elle a écrit pour le *New Scientist* et le Foundational Questions Institute et a déjà été rédactrice pour SciDev.Net. Elle détient un doctorat en physique des plasmas dans l'espace ainsi qu'une maîtrise en communication scientifique.

Alexander Hellemans est un rédacteur scientifique qui a été publié dans *Science, Nature, Scientific American, BBC Focus,* le *Guardian*, le *New Scientist, The Scientist, IEE Spectrum, Chemical and Engineering News*, pour ne nommer que ceux-là. Il a co-écrit avec Bryan Bunch *The History of Science and Technology : A Browser's Guide to the Great Discoveries, Inventions and the People Who Made Them from the Dawn of Time to Today.* Les deux auteurs ont écrit *The Timetables of Science : A Chronology of the Most Important People and Events in the History of Science* et *The Timetables of Technology : A Chronology of the Most Important People and Events in the History of Technology.*

Sharon Ann Holgate est rédactrice scientifique à la pige. Forte de son doctorat en physique, elle a écrit pour des journaux et des magazines comme le *New Scientist* et *Focus*, elle a animé des émissions à la BBC (Radio 4) ainsi qu'une minisérie du BBC World Service et elle a accordé des entrevues vidéo au Myrovlytis Trust. Elle a coécrit *The Way Science Works*, un manuel de science populaire destiné aux enfants qui a été nominé pour l'attribution du prix Aventis 2003 dans la catégorie des livres scientifiques destinés à la jeunesse, et a aussi écrit le manuel de premier cycle *Understanding Solid State Physics*. En 2006, elle a remporté le Young Professional Physicist of the Year pour ses efforts de communication de la physique.

Andrew May est consultant technique et rédacteur pigiste sur des sujets allant de l'astronomie à la physique quantique en passant par l'analyse de la défense et la technologie militaire. Après avoir été lecteur en sciences naturelles à l'Université de Cambridge, dans les années 1970, il a obtenu un doctorat en astrophysique de l'Université de Manchester. Depuis lors, il a cumulé plus de 30 années d'expérience dans le monde universitaire, la fonction publique scientifique et le secteur privé.

INDEX

A

accélérateur de particules 36, 48
Aharonov, Yakir 88
Allen, John 142
alpha (particules) 76, 80
Anderson, Carl 60, 62
antimatière 56, 60, 63, 66, 68, 70, 136
appareil d'IRM 96, 124
Ashtekar, Abhay 152
Aspect, Alain 100, 102
atomique (bombe) 77
atome 6

B

Balmer, Johann Jakob 22
Bardeen, John 120, 140
Bell, John 100, 102-103
Bell (inégalité de) 100, 103
Bell (théorème de) 102, 103
Bennett, Charles H. 104, 110
big bang 152
Binnig, Gerd 80
Bohm, David 88-89
  Aharonov-Bohm (effet) 88
  diffusion 76, 88
  interprétation 50, 86
Bohr, Niels 26-27
  interprétation de Copenhague 26, 45, 84
  modèle quantique de l'atome 22, 58
  principe de complémentarité 28, 84
  rencontre Satyendra Bose 147
  spectres atomiques 60
Bohrium 26
Born, Max 40, 57
Bose, Satyendra 146-147
Bose-Einstein (condensat de) 142, 144, 147
boson, 56, 136, 140, 142 144, 147
boucle (voir gravité quantique)
Brassard, Gilles 104
Brattain, Walter 120

C

Casimir (effet) 138
Casimir, Hendrik 138
CERN 36, 102, 103, 136, 148
Chiao, Raymond 82
chiffrement 10, 96, 100, 104, 108
Clifford, William 60
Cooper, Leon N. 140
Cooper (paires de) 117, 126, 140
Copenhague (interprétation de) 26, 45, 50, 84, 89, 90, 92
cordes (voir Théorie des)
corps noir 14, 16, 18
Crick, Francis et Watson, James 45
Curie, Marie 147

D

Davies, Paul 150
Davisson, Clinton 28, 30
De Broglie, Louis 27, 28, 30, 42, 50, 86
De Broglie-Bohm (théorie de) 86
désintégration (voir Radiocative)
décohérence 52, 106
déterminisme 86, 89
De Valera, Éamon 45
Dirac, Paul 62-63
  antimatière 56
  QED 66
  renormalisation 68
  tentative de quantification de la relativité générale 152
dopage 116, 120
double fente quantique (expérience de la) 32, 84, 86, 92, 144

E

Einstein, Albert
  ami et collègue de David Bohm, 88-89
  Bose et Bose-Einstein (condensat de) 144, 147
  « Dieu ne joue pas aux dés » 8
  EPR (expérience de pensée) 76, 97, 98
  intrication quantique 10, 97, 100
  photoélectrique (effet) 20
  photons 28, 32
  relativité générale 152
électrons 20, 22, 24, 27, 28, 30, 32, 38, 42, 56, 57, 64, 70, 120, 122, 126, 130, 140, 142, 144, 150
électrons (coquilles d') 56
énergie au zéro absolu 11, 136, 138
espace-temps 36, 56, 136, 152

F

fermions, 57, 58, 140, 142, 144
Fleming, Graham 150
fonction d'onde 36, 42, 50, 76, 80, 90, 150
Forward, Robert L. 138
Franck, James 27
Feynman, Richard 32, 68, 70, 108

G

gamma (radiation) 76
Gerlach, Walther 38
germanium 120
Germer, Lester 30
glu (boules de) 136, 148
gluon 137, 148
Goudsmit, Samuel 38
Gould, Gordon 118
gravité 50, 64, 137, 152
gravité quantique à boucles 152
Gross, David 148

H

Hameroff, Stuart 150
hadrons (Grand collisionneur de) 36, 48, 136, 140
Haroche, Serge, 106
Hau, Lene Vestergaard 144
Hawking (radiation) 15, 16
Hawking, Stephen 15
Heisenberg, Werner
  et Bohr 27, 84
  et Bose 147
  mécanique matricielle 40, 57
  principe d'indétermination 40, 48, 138
Higgs (boson de) 56, 136, 148
Hund, Friedrich 80

I

Ignacio, Juan 46
impulsion angulaire 37
impulsion (conservation de l') 96, 98
invisibilité (cape d') 132
isotope 57

J

Jacobsen, Carl 27
Jordan, Pascual 40
Josephson, Brian 128-129
  jonctions de Josephson 116, 126, 129
  paires de Cooper 126

K

Kapitsa, Pyotr 142
Krishnamurti, Jiddu 89

L

Lauterbur, Paul 124
Lenard, Philipp 20
Leonhardt, Ulf 132
Lepton 14
libre arbitre 86

M

Maiman, Theodor 118
Manhattan (voir Projet Manhattan)
Mansfield, Peter 124
Maxwell (équations) 57
Maxwell, James Clerk 57, 66, 72
Mermin, David 84
mesure (problème de la) 50
microélectronique 80
Milikan, Robert 20
Misener, Donald 142
mondes multiples (interprétation des) 90, 92
Moore, Gordon, 116
Moore (loi de) 116, 120
Mozart, Wolfgang Amadeus 82

N

nanotechnologie 122
navigation des oiseaux (voir oiseaux)
neutron 56, 57, 76, 148
Newton, Isaac 45, 63, 82
Nimtz, Günther 82
Nobel (prix de physique)
1913 Heike Kamerlingh Onnes 140
1918 Max Planck 16
1921 Albert Einstein 20
1922 Niels Bohr 26
1933 Erwin Schrödinger et Paul Dirac 44, 62
1956 John Bardeen, Walter Brattain et William Schockley 120
1972 John Bardeen, Leon Cooper et John R. Schieffer 140
1973 Leo Esaki, Brian Josephson et Ivar Glaever 128
1978 Pyotr Kapitsa 142
1986 Gerd Binnig et Heinrich Rohrer 80
2004 David Gross, H. David Politzer et Frank Wilczek 148
2012 Serge Haroche et David J. Wineland 106
Nobel (prix de physiologie ou de médecine)
2003 Paul Lauterbur et Peter Mansfield 124

O

oiseaux (navigation) 112, 150
Onnes, Heike Kamerlingh 124, 140, 142
Oppenheimer, Robert 88

P

particules (voir accélérateur de)
Pauli (principe d'exclusion de) 56, 58, 117, 130, 137, 142
Pauli, Wolfgang 38, 58
Pendry, John 132
Penrose, Roger 50, 90, 150
photoélectrique (effet) 20, 28
photon 14, 20, 28, 32, 70, 82, 106, 118, 130, 132, 136, 148
photosynthèse 150
Planck (relation de) 18
Planck, Max 16, 18, 20, 32, 44, 147
Planck (constante de) 14, 16, 48
Planck (loi de) 14
Podolsky, Boris 98, 100
Politzer, H. David 148
positron 56, 57, 62
projet Manhattan 77, 88
proton 57, 76, 137, 148, 150

Q

quanta 15, 16, 18, 24
quantique(s)
bit 96, 106, 108
intrication 52, 77, 78, 97, 100, 104, 106, 110, 112, 150
mécanique 16
nombres 57, 58
point(s) 97, 106, 130
saut 15, 24
superposition 37, 46, 52, 78, 84, 97, 100, 106, 120, 130, 150
quarks 57, 136, 137, 148
qubits 96, 106, 108

R

radioactive (désintégration) 46, 50, 76, 80, 112
Rohrer, Heinrich 80
Rosen, Nathan 98, 100
Rosenfeld, Léon 22
Rutherford, Ernest 24, 27

S

Schrieffer, John R. 140
Schrödinger, Erwin 27, 28, 40, 42, 44-45, 48, 57, 100
chat de 44-45, 46, 76, 90, 92, 100
critique de l'EPR 98
directeur de physique théorique à Dublin 45
et Bohr 27
équation d'onde 28, 42, 45, 50, 60, 76
intrication quantique 100
mécanique matricielle 40, 48, 57
mysticisme et philosophie 45
rencontre Satyendra Bose 147
Schwinger, Julian 68
semi-conducteurs 80, 116, 118, 120, 130, 132
Schockley, William 120
silicium 120
singularité 15, 137, 152
Sommerfeld, Arnold 58
SQUID, 117, 126, 128
Stern, Otto 38
Sudarshan, E.C. George 112
supraconductivité et supraconducteurs 117, 120, 124, 126, 129, 137,140, 142

T

théorie des cordes 152
théorie des champs quantifiés 64
Thomson, George 28, 30
Thomson, J. J. 24, 27
T'Hooft, Gerard 64
Tomonaga, Sin-Itiro 68
treillis photonique 117, 132
trou noir 15, 137, 152
tunnel (effet) 76, 80, 82, 126, 130, 150

U

Uhlenbeck, George 38

V

Veltman, Martinus 64
Veselago, Victor 132
Von Neumann, John 90
Von Weizsäcker, Carl 27

W

Wheeler, John Archibald 32, 72
Wien, Wilhem 16
Wigner, Eugene 46, 62, 90
Wilzcek, Frank 148

Y

Young, Thomas 32

Z

Zeh, Heinz-Dieter 52
Zeilinger, Anton 104, 110
Zénon d'Élée 112

REMERCIEMENTS

CRÉDITS ILLUSTRATIONS
L'éditeur souhaite remercier les personnes et les organismes mentionnés ci-dessous, qui ont aimablement autorisé la reproduction des images dans ce livre. Nous n'avons ménagé aucun effort pour en référencer les crédits ; nous vous prions de bien vouloir pardonner toute éventuelle omission involontaire.

À moins d'avis contraire, toutes les images proviennent de Shutterstock inc. (www.shutterstock.com) et de Clipart Images (www.clipart.com).

Bettmann/Corbis : 44, 62, 67.
Archives fédérales allemandes : 41.
H. Raab : 111.
Kelvin Fagan/Cavendish Laboratory : 128.
Keystone/Getty Images : 88.
Library of Congress, D.C. : 26, 99.
NASA : 59.
Queen's University, Belfast : 102.
SSPL/Getty Images : 71.